



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS

RICARDO DAVID CASTILLO SALAZAR

MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA DA
BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BETUME, BAIXO
SÃO FRANCISCO SERGIPANO

São Cristóvão

2016

RICARDO DAVID CASTILLO SALAZAR

**MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA DA
BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BETUME, BAIXO
SÃO FRANCISCO SERGIPANO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Núcleo do Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos (PRORH) da Universidade Federal de Sergipe, como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Antenor de Oliveira Aguiar Netto

São Cristóvão

2016

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

S161m Salazar, Ricardo David Castillo
Modelagem hidrossedimentológica da bacia hidrográfica do rio
Betume, Baixo São Francisco Sergipano / Ricardo David Castillo
Salazar ; orientador Antenor de Oliveira Aguiar Netto. – São
Cristóvão, 2016.
84 f. : il.

Dissertação (mestrado em Recursos Hídricos)– Universidade
Federal de Sergipe, 2016.

1. Recursos hídricos - Desenvolvimento. 2. Bacias
hidrográficas. 3. Hidrologia - Sergipe. I. Aguiar Netto, Antenor de
Oliveira, orient. II. Título.

CDU 556.18(813.7)

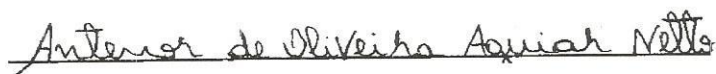
RICARDO DAVID CASTILLO SALAZAR

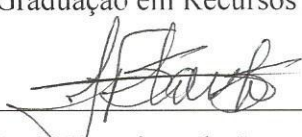
**MODELAGEM HIDROSSEDIMENTOLÓGICA DA
BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BETUME, BAIXO SÃO
FRANCISCO SERGIPANO**

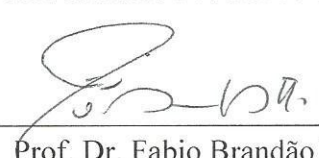
Dissertação de Mestrado apresentada ao Núcleo do Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos (PRORH) da Universidade Federal de Sergipe, como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos.

APROVADA em: 28/01/2016

Banca Examinadora


Prof. Dr. Antenor de Oliveira Aguiar Netto (Orientador)
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos


Prof. Dr. Inajá Francisco de Sousa
Universidade Federal de Sergipe


Prof. Dr. Fábio Brandão Brito
Instituto Federal de Sergipe

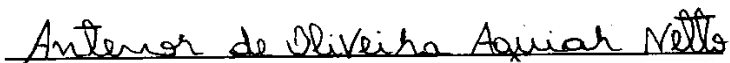
São Cristóvão

2016

É concedida ao Núcleo responsável pelo Mestrado em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Sergipe permissão para disponibilizar, reproduzir cópias desta dissertação e emprestar ou vender tais cópias.

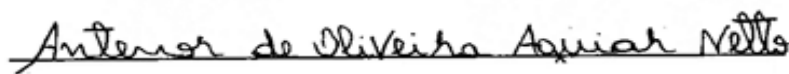


Ricardo David Castillo Salazar – Autor
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos/UFS



Prof. Dr. Antenor de Oliveira Aguiar Netto (Orientador)
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos/UFS

Este exemplar corresponde à versão final da Dissertação de Mestrado em Recursos Hídricos.

A handwritten signature in black ink, reading "Antenor de Oliveira Aguiar Netto". The signature is written in a cursive style and is positioned above a horizontal line.

Prof. Dr. Antenor de Oliveira Aguiar Netto (Orientador)
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos/UFS

Epígrafe

Porquanto a terra que absorve a chuva que cai de tempo em tempo, e dá colheita proveitosa àqueles que a cultivam, recebe a bênção de Deus. (Hebreus 6:7)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço imensamente a Deus pelas bênçãos recebidas sem eu merecer, e por me ajudar e me iluminar sempre na minha vida pessoal e profissional.

Aos meus pais Rosa e Arnaldo, e a minha avó Aidita por estarem sempre me apoiando, alentando e orando para atingir meus objetivos, mesmo estando longe eu senti-os por perto e aos meus irmãos por estarem sempre de meu lado.

Ao Professor Doutor Antenor Aguiar Netto, pela orientação, confiança e amizade. Em especial pela paciência e apoio incondicional no desenvolvimento desta pesquisa. Que Deus abençoe sempre!

A Irane Gonçalves pela ajuda para realizar o programa do mestrado na prestigiosa Universidade Federal de Sergipe.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos, pelas aulas e todo o suporte para a realização dos estudos e ampliação de conhecimentos.

Aos técnicos e pesquisadores do Projeto Águas do São Francisco e ao Grupo Acqua, em especial a Thadeu Ismerim e Ricardo Rogério, muito obrigado pelo apoio logístico e sobre tudo pela amizade e a parceria durante a coleta de dados.

Aos meus colegas do mestrado, obrigado pelo calor, acolhimento, amizade e parceria. Em especial a Julieta, Jeisikailany e Amanda, pela troca de experiências e convivência. Com vocês aprendi que a ‘amizade é tudo’.

A Natalia Negromonte pela amizade, paciência, apoio e ajuda em todo momento desde minha chegada ao Brasil.

A Beatriz Santiago, pela amizade, convivência e ajuda incondicional para concluir este trabalho e aos professores Marinoé e Fabio cuja contribuição foi decisiva para finalizar esta pesquisa.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudo.

Esta pesquisa teve apoio do Projeto

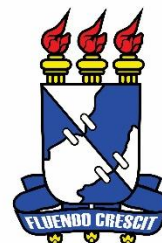
ÁGUAS

do **São Francisco**

REALIZAÇÃO:



SergipeTec
Sergipe Parque Tecnológico



Universidade Federal de Sergipe

PATROCÍNIO:



PETROBRAS

GOVERNO FEDERAL
BRASIL
PÁTRIA EDUCADORA

RESUMO

O uso racional dos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica é indispensável para sua sustentabilidade e desenvolvimento socioeconômico. O uso adequado do solo e a cobertura vegetal está intimamente relacionada à conservação dos recursos hídricos como a preservação do meio ambiente. Uma importante ferramenta para a representação e compreensão do comportamento hidrológico de uma bacia é a modelagem. Nesse sentido, a partir do monitoramento quantitativo da vazão, se usou o modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool), com o qual se estudou a dinâmica hidrossedimentológica da bacia hidrográfica do rio Betume no Baixo São Francisco Sergipano, o modelo usa um banco de dados especializado da bacia, constituído de informações geográficas, pedológicas, hidrológicas e climáticas. Se realizaram 3 cenários em função do uso da terra simulando a produção de água e sedimentos. A modelagem demonstrou que a dinâmica da bacia se baseia principalmente no fluxo de escoamento de base. Dos 3 cenários hipotéticos realizados, o cenário Reflorestação produziu a menor taxa de produção de água e sedimentos, e o cenário Agricultura apresentou as maiores taxas. Constatando-se que as alterações no uso e ocupação da terra influenciam no regime de produção de água e sedimentos na bacia. Com tudo se ressalta que a presença de vegetação nativa garante a maior disponibilidade hídrica para os múltiplos usos da água na região.

PALAVRAS-CHAVES: Recursos Hídricos, Bacia Hidrográfica, Modelagem Hidrológica, SWAT

ABSTRACT

The rational use of water resources of a river basin is essential for sustainability and socio-economic development. Proper land use and vegetation cover is directly related to the conservation of water resources and the preservation of the environment. An important tool for the representation and understanding of the hydrological behavior of a watershed is modeling. In this sense, from the quantitative monitoring of the flow, used the SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model, which is used to study the dynamics of the hydrossedimentological river basin Betume in the Lower São Francisco in the estate of Sergipe. The model uses a specialized database of the basin, consisting of geographical, soil, hydrological and climate information. Had accomplished three scenarios depending on the land use simulating the production of water and sediments. The modeling demonstrated that the dynamics of the basin is mainly based on the base flow stream. Of the three hypothetical scenarios performed, the Reforestation scenario produced the lowest water and sediment production rate, and the Agriculture scenario had the highest rates. Having noticed the changes in land use and occupation influence the water production system and sediments in the basin. Overall, it is noteworthy that the presence of native vegetation ensures the highest water availability for multiple uses of water in the region.

KEYWORDS: Water Resources, Hydrographic basin, Hydrological modeling, SWAT.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Betume	23
Figura 3.2 – Modelo Digital de Elevação da bacia hidrográfica do rio Betume	25
Figura 3.3 – Tipos do solo e pontos de amostragem na bacia hidrográfica do rio Betume. 27	
Figura 3.4 – Mapa de uso da terra da bacia hidrográfica do rio Betume.....	28
Figura 3.5 – Perfil da seção transversal á montante do rio na Ponte Serigy com a largura e as profundidades para a determinação da vazão do rio Betume	28
Figura 3.6 A – Mapa pontos de monitoramento da vazão.....	30
Figura 3.6 B – Molinete hidrométrico	30
Figura 3.6 C – Medição da largura da seção do rio Betume	30
Figura 3.6 D – Medição da profundidade da seção do rio Betume	30
Figura 3.6 E – Medição da velocidade com molinete digital GlobalWater	30
Figura 3.7 – Parâmetros mais sensíveis determinados no SWAT-CUP para modelagem do rio Betume	37
Figura 4.1 – Hidrograma para avaliação dos resultados do monitoramento da vazão do rio Betume na estação Ponte Serigy	41
Figura 4.2 – Hidrograma das estações de monitoramento Ponte Serigy e SEMARH.....	42
Figura 4.3 – Curva-chave da vazão para o rio Betume	43
Figura 4.4 – Modelo Digital de Elevação da bacia hidrográfica do rio Betume usado no SWAT com a delimitação da área de estudo.....	47
Figura 4.5 A – Subbacias geradas pelo SWAT na bacia hidrográfica do rio Betume.....	48
Figura 4.5 B – Unidades de rsposta hidrológica geradas pelo SWAT	46
Figura 4.6 C – Mapa do tipo do solo gerados pelo SWAT	50
Figura 4.6 D – Mapa do uso e ocupação da terra gerado pelo SWAT	50
Figura 4.7 – Hidrograma da vazão mensal referente à calibração.....	51
Figura 4.8 – Hidrograma da vazão mensal referente à validação.....	51
Figura 4.9 – Produção de água nos cenários 1, 2 e 3.....	57
Figura 4.10 – Produção de sedimentos nos cenários 1, 2 e 3	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Associação do uso e ocupação da terra na bacia hidrográfica do rio Betume compatível com o banco de dados do SWAT.....	32
Tabela 3.2 - Parâmetros e limites dos parâmetros usados na análise de sensibilidade.....	35
Tabela 3.3 – Critérios de avaliação de desempenho de modelos hidrológicos e suas respectivas classificações	37
Tabela 4.1 – Dados de vazão medidos na estação Ponte Serigy no rio Betume	40
Tabela 4.2 – Ordem de sensibilidade dos parâmetros para simulação da vazão da bacia hidrográfica do rio Betume.....	45
Tabela 4.3 – Classificação dos solos na modelagem com SWAT na bacia hidrográfica do rio Betume	49
Tabela 4.4 – Uso e ocupação do solo da modelagem com SWAT.....	49
Tabela 4.5 – Valores das médias anuais dos resultados da simulação para os três cenários entre o período de 2002 a 2014	54

SUMARIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. REFERENCIAL TEÓRICO	
2.1 Recursos Hídricos	12
2.2 Bacia Hidrográfica	14
2.3 Modelagem Hidrológica	15
2.4 Modelo SWAT	17
3. METODOLOGIA DA PESQUISA	
3.1 Área de Estudo	22
3.2 Dados de entrada no modelo SWAT	24
3.2.1 Modelo Digital de Elevação - DEM	24
3.2.2 Amostras do Solo, Mapas de Solo e Uso do Solo	25
3.2.3 Monitoramento da Vazão	28
3.2.4 Dados Climáticos	31
3.3 Modelagem	31
3.4 Análise de Sensibilidade, Calibração e Validação dos Parâmetros	33
3.5 Construção de Cenários	37
4. RESULTADOS	
4.1 Monitoramento da vazão	40
4.2 Análise de sensibilidade	44
4.3 Modelagem da bacia hidrográfica do rio Betume	46
4.4 Calibração e Validação do modelo SWAT	50
4.5 Cenários	54
5. CONCLUSÕES	62
6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	64

ANEXOS 79

1. INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos de uma bacia hidrográfica e seu uso racional são indispensáveis para sua sustentabilidade e desenvolvimento socioeconômico. O uso adequado do solo e a cobertura vegetal está intimamente relacionada à conservação dos recursos hídricos como a preservação do meio ambiente. Nessa interrelação entre o uso da terra, do solo e da água; o que quer que aconteça a um afeta os outros. Por isso, a importância do conhecimento dos processos que podem afetar essa relação é essencial para quantificar as alterações que podem sofrer na quantidade, qualidade e regime dos recursos hídricos.

O desenvolvimento promovido pela sociedade, tem feito alterações na natureza e no meio ambiente. Uma das consequências negativas são o uso e manejo do solo de forma inadequada nas atividades agrícolas podendo estas ocorrer em diferentes escalas; razão pela qual é cada vez mais forte o interesse e a necessidade de se estabelecer políticas adequadas de gestão do uso da terra e dos recursos naturais, para evitar escassez de água e a degradação das bacias hidrográficas.

O Brasil embora contar com abundantes recursos hídricos, a distribuição destes não é favorável, enquanto a região Amazônica possui abundante água e pouca população, o resto das regiões tem maior população e menor disponibilidade hídrica, na qual o Nordeste é a mais afetada (BRASIL, 2007). Em função dos problemas relativos a um adequado sistema de gestão da água, se estabelece no Brasil a lei 9.433/97 a qual determina a Bacia Hidrográfica como unidade de planejamento e gestão, permitindo assim, determinar as prioridades do manejo e ocupação das áreas de uma bacia com maior facilidade, para mitigar os impactos ambientais negativos.

O estado de Sergipe se divide em oito bacias hidrográficas, uma delas é a bacia hidrográfica do Baixo São Francisco, na qual está inserida a bacia hidrográfica do rio Betume, afluente da margem direita do Baixo São Francisco; onde o perímetro irrigado instalado nessa região tem a rizicultura como principal atividade agrícola, e vem sofrendo dificuldades de captação de água para abastecer o perímetro irrigado da zona, assim como problemas de contaminação pelo uso de agrotóxicos na crescente demanda das atividades agrícolas, a degradação das nascentes e do meio ambiente (SANTOS et al, 2015; BRITTO et al, 2015)

O comportamento hidrológico de uma bacia pode ser estudado e compreendido através de uma simulação hidrológica por meio da modelagem, convertendo-se em uma das principais ferramentas na gestão dos recursos hídricos. A modelagem permite antecipar eventos, como a representação do impacto do desmatamento de uma bacia antes que ela ocorra, previsão de uma enchente em tempo real, o impacto da alteração de um rio, a ocorrência de eventos extremos estatisticamente possíveis (TUCCI, 2005), ajudando no planejamento e gestão na tomada de decisões.

Na atualidade, o avanço tecnológico de ferramentas computacionais para modelagem hidrológica vem sendo desenvolvida para predição de erosão, produção de água e produção de sedimentos para serem utilizados no planejamento racional e sustentável dos recursos naturais. Através da modelagem é possível criar cenários atuais e futuros onde modificações do clima, uso e manejo de solo podem ser alteradas para se estudar as respostas causadas à hidrologia, ao solo e a quantidade e qualidade da água. Através da criação de cenários, é possível buscar formas de organização de uso das terras de forma sustentável onde a sociedade possa usufruir desses recursos, mas preservando-os para as gerações futuras.

Um desses modelos, o Soil and Water Assessment Tool (SWAT), que permite uma grande flexibilidade na configuração de bacias hidrográficas. Este modelo se destaca porque é de plataforma livre, gratuito e permite que um número de diferentes processos físicos, sejam simulados. O modelo foi desenvolvido para predizer o efeito de diferentes cenários de manejo na qualidade da água, produção de sedimentos e cargas de poluentes em bacia hidrográficas agrícolas (NEITSCH et al, 2005).

Nesse contexto, O presente trabalho estudou a dinâmica hidrossedimentológica da bacia hidrográfica do rio Betume a partir do monitoramento quantitativo, avaliando a produção da água e sedimentos usando a ferramenta de modelagem SWAT, simulando cenários em função do uso da terra.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Recursos Hídricos

Os recursos hídricos ocupam um lugar especial entre outros recursos naturais. A água é a substância mais amplamente distribuída em nosso planeta, embora em quantidades diferentes, que está disponível em todos os lugares e desempenha um papel vital, tanto no meio ambiente assim como na vida humana (SHIKLOMANOV, 1998).

Segundo Setti et. al (2001) a água é um recurso renovável devido à sua capacidade de se recompor em quantidade através do chamado ciclo hidrológico, principalmente pelas chuvas, mas é considerada um recurso finito, pois, pode ser comprometida facilmente pela poluição, tornando-se inadequada para o uso humano. É de ocorrência aleatória, pois sua distribuição é irregular no tempo e no espaço, sendo influenciada pelas condições climáticas e meteorológicas.

Do total da água no planeta, a água salgada corresponde 97,5%, contra 2,5% de água doce. Da água doce disponível, 68,9% encontra-se em calotas polares, 0,3% em rios e lagos, 29,9 em aquíferos e 0,9% se encontra na biomassa, na umidade do solo e no vapor da atmosfera (RODRIGUES et. al., 2013).

As crescentes demandas de água acarretam problemas em muitas partes do mundo. Em alguns casos, seu uso indiscriminado e as ações antrópicas, têm ocasionado o secamento parcial e às vezes total de rios, açudes, lagos e aquíferos subterrâneos como os ocorridos com o mar de Aral na Ásia Central, e com a Lagoa Nakuru em Kenia. Além do crescimento populacional, a urbanização e a industrialização que se crescem cada vez mais, aliados ao desmatamento e a poluição dos corpos hídricos vêm alterando o clima, produzindo grandes impactos no meio ambiente que afeta a produção de água, como o degelo do Glaciar Columbia em Alaska e na Serra de California (LIMA COP20, 2014)

Segundo BIO (1999), atualmente, 29 países não possuem água doce para toda a população. Em 2025 segundo a previsão da Organização das Nações Unidas - ONU serão 48 países e em 2050 cerca de 50 países sem água em quantidade suficiente para toda a população. Em regiões onde a situação de falta de água já atinge índices críticos de disponibilidade, como nos países do Continente Africano, onde a média de consumo de água por pessoa é de dezenove metros cúbicos/dia, ou de dez a quinze litros/pessoa. Já em Nova

York, há um consumo exagerado de água doce tratada e potável, aonde um cidadão chega a gastar dois mil litros/dia. (BRASIL, 2015).

A Resolução nº 32, de 15 de outubro – CONAR (Conselho Nacional de Recursos Hídricos) divide o território brasileiro em 12 regiões hidrográficas, sendo elas: Amazônica, Tocantins-Araguaia, Atlântico Nordeste Ocidental, Atlântico Nordeste Oriental, Parnaíba, São Francisco, Atlântico Leste, Atlântico Sudeste, Atlântico Sul, Paraná, Paraguai e Uruguai. A região do São Francisco divide-se em 3 (três) sub-regiões: alto, médio e baixo São Francisco. É no baixo São Francisco onde se localiza a Bacia Hidrográfica do rio Betume, no Estado de Sergipe.

Segundo Rodrigues et al. (2013); o Brasil é um país privilegiado em relação à disponibilidade hídrica, porém, cerca de 70% da água doce do país encontra-se na região amazônica, que é habitada por menos de 5% da população, a vazão média desta região é quase três vezes maior que a soma das vazões das demais regiões hidrográficas. As menores disponibilidades hídricas por habitante/ano encontram-se nas regiões hidrográficas localizadas no Nordeste brasileiro (Atlântico Nordeste Oriental com 1.169 m³ por habitante/ano)

Rebouças (2002) e Tundisi (2003) diz que a distribuição de água nas atividades humanas no Brasil corresponde à irrigação 69% do consumo de água, 10% para abastecimento urbano, 7% na indústria e 14% outras atividades. Os problemas de escassez hídrica no Brasil decorrem, fundamentalmente, da combinação entre o crescimento exagerado das demandas localizadas e da degradação da qualidade das águas. Esse quadro é consequência dos desordenados processos de urbanização, industrialização e expansão agrícola (SETTI et al., 2001).

No Estado de Sergipe existem 08 (oito) Bacias Hidrográficas: bacias do Rio São Francisco, Rio Vaza Barris, Rio Real, Rio Japarutuba, Rio Sergipe, Rio Piauí, Grupo de Bacias Costeiras 1 (GC1) e Grupo de Bacias Costeiras 2 (GC2). O rio São Francisco, Vaza Barris e Real são rios federais por que atravessam mais de um Estado. Enquanto os rios Japarutuba, Sergipe e Piauí são rios estaduais, pois suas bacias estão dentro do Estado de Sergipe (BRASIL 2015).

Em função dos problemas relativos à falta de um adequado sistema de gestão da água, cada vez mais evidentes, o setor de recursos hídricos vem ganhando importância e interesse por parte da sociedade brasileira. Com base na Lei nº 9.433/97, a Política Nacional dos

Recursos Hídricos (PNRH), busca assegurar para atual e futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em quantidade e em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos, estabelecendo a utilização racional e integrada dos recursos hídricos, incluindo o transporte hidroviário, com vistas ao desenvolvimento sustentável.

A Política Estadual dos Recursos Hídricos (PERH) determina a gestão sistemática dos recursos hídricos na qual considera os aspectos quantitativos e qualitativos da água, a integração da gestão de recursos hídricos com a gestão ambiental e do uso do solo, assim como de bacias hidrográficas com sistemas estuarinos e zonas costeiras, articulação do planejamento de recursos hídricos estadual, regional e nacional entre si e com os setores usuários, além da articulação com municípios para gerenciamento dos recursos hídricos de interesse comum (BRASIL, 2015).

Assim como a PNRH, a PERH considera alguns instrumentos com sendo ferramentas indispensáveis a serem empregados de modo a alcançar uma gestão adequada de Recursos Hídricos e capaz de proteger e melhorar as condições de qualidade e quantidade das águas do Estado para as atuais e futuras gerações. Desse modo, a PERH de Sergipe considera como instrumentos o Plano Estadual de Recursos Hídricos, o Enquadramento de corpos d'água em classes, segundo usos preponderantes da água, o Fundo Estadual de Recursos Hídricos, a Outorga dos direitos de uso dos recursos hídricos, a Cobrança pelo uso da água e o Sistema Estadual de Informações.

2.2 Bacia Hidrográfica

Silva (2013) menciona que o homem desde sua existência desenvolveu suas atividades dentro de uma bacia hidrográfica, a qual é composta por um sistema dinâmico e complexo. Dinâmico pela ocorrência dos processos referentes ao ciclo hidrológico, e complexa devido à interação desses processos que ocorrem na bacia hidrográfica, tais como precipitação, escoamento superficial, infiltração, evapotranspiração e também transporte de sedimentos.

A bacia hidrográfica é a unidade hidrológica fundamental delimitada pelos divisores de água que definem um sistema de drenagem (RIGHETTO, 1998). Tucci et al. (1997) descreve a bacia hidrográfica como a área de captação natural da água de precipitação que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída chamado exutório.

A bacia hidrográfica como unidade de planejamento já é de aceitação mundial, uma vez que esta se constitui num sistema natural bem delimitado geograficamente, onde os fenômenos e interações podem ser integrados a priori pelo input e output. Assim, bacias hidrográficas podem ser tratadas como unidades geográficas, onde os recursos naturais se integram. Além disso, constitui-se uma unidade espacial de fácil reconhecimento e caracterização, considerando que não há qualquer área de terra, por menor que seja que não se integre a uma bacia hidrográfica e, quando o problema central é água, a solução deve estar estreitamente ligada ao seu manejo e manutenção (SANTOS, 2004).

O planejamento da ocupação de bacias hidrográficas visando o desenvolvimento sustentável é condicionado por um grande número de variáveis, que estão relacionadas de forma bastante complexa e marcadas pela incerteza. Em consequência deste fato, torna-se difícil a formulação de juízos absolutos, sobre os impactos nos fenômenos hidrossedimentológicos decorrentes da ocupação humana nestas bacias hidrográficas. Nestes casos costuma-se recorrer a estudos de cenários alternativos que correspondam a combinações consistentes das variáveis mais relevantes (BAHIA, 1995b).

Segundo Santos (2002), a lei federal 9.433 de janeiro de 1997 ou Lei das Águas tem como princípio fundamental a gestão de recursos hídricos por bacia hidrográfica, de forma descentralizada com a participação do poder público, dos usuários e da comunidade.

2.3 Modelagem Hidrológica

A modelagem hidrológica é uma técnica que possibilita o melhor entendimento e representação do comportamento hidrológico de bacias hidrográficas, sendo que os modelos hidrológicos possuem grande potencial para caracterizar a disponibilidade hídrica em condições de mudanças no clima ou no uso do solo (TUCCI, 2005).

Kuwajima (2012) diz que estes modelos são úteis quando o monitoramento dos processos que ocorrem em cada terreno e curso de uma bacia é inviável e muito caro. Para Aguiar Netto (2010) os modelos hidrológicos são úteis nos estudos ambientais e no planejamento para uso eficiente da água em sistemas de irrigação, solucionar conflitos de usos da água, avaliar efeito da mudança no uso da terra, e na avaliação das águas subterrânea e superficial qualitativa e quantitativamente.

Para Collischonn & Tucci (2001), os modelos hidrológicos são divididos de acordo com: os tipos de variáveis utilizadas (estocástico ou determinístico), forma de representação das variáveis de entrada (contínuo ou discreto), representação dos processos dentro da estrutura matemática do modelo (empírico ou de base conceitual), discretização ou não da variabilidade espacial das variáveis (concentrado ou distribuído) e o mesmo do anterior, somente para variabilidade temporal (estático ou dinâmico). Um modelo hidrológico pode aliar mais de uma das características citadas acima, não necessariamente pertencendo a somente um grupo.

A estrutura dos modelos hidrológicos é baseada nos seguintes elementos: discretização da bacia hidrográfica (dependente do modelo), variáveis de entrada (chuva, evapotranspiração), estrutura básica da integração dos processos (bacia, canal, encosta), aquisição de dados físicos das bacias e determinação dos parâmetros (TUCCI, 2005)

A modelagem hidrológica é uma ferramenta para elaborar simulação de vazões em cursos de água de bacias hidrográficas para se obter conhecimento mais aprofundado a respeito dos fenômenos físicos envolvidos e na previsão de cenários. Os processos de precipitação, evaporação, infiltração, escoamento em rios, dependem de um grande número de variáveis que nem sempre podem ser medidas (MORAES, 2003).

A escolha do modelo hidrológico depende de uma avaliação preliminar envolvendo os seguintes aspectos: objetivos do estudo para qual o modelo vai ser utilizado; características climáticas e físicas da bacia e do rio; disponibilidade de dados e familiaridade da equipe de projeto com o modelo. No uso de modelos chuva-vazão existem quatro fases distintas: a escolha do modelo, calibragem de seus parâmetros, validação do modelo calibrado e aplicação (ENOMOTO, 2004).

Segundo Silva (2013), nenhuma metodologia substitui as medições de informações que permitam aferir os parâmetros do modelo utilizado. Quanto menor for a disponibilidade de informações, maiores serão as incertezas dos prognósticos, visto que uma das limitações na utilização de modelos hidrológicos é a disponibilidade de dados. Tal disponibilidade refere-se à quantidade (muitas séries de dados hidrológicos apresentam falhas) e a qualidade (muitos dados são mal medidos ou mal observados).

Os modelos chuva-vazão devem descrever a distribuição espacial da precipitação, as perdas por interceptação, evaporação, depressão do solo, o fluxo através do solo pela

infiltração, percolação e água subterrânea, escoamento superficial, sub-superficial e na calha do rio. As principais dificuldades encontradas nos modelos chuva-vazão devem-se a grande variabilidade espacial das precipitações, as incertezas dos dados de evaporação, o fator da escala entre processos pontuais e espaciais, e a homogeneidade dos parâmetros (OLIVEIRA, 2003)

Existem atualmente diversos modelos hidrológicos, entre os quais destacam-se: *Topography-based hydrological model* – TOPMODEL, *Kinematic Runoff and Erosion Model* - KINEROS, *Water Erosion Prediction Project* - WEPP; *Areal Non-point Source Watershed Environment Response Simulation* - ANSWERS; *Modelling System for Rivers and Channels* – MIKE 11; *Kentucky Erosion Model* - KYERMO; *European Soil Erosion Model* - EUROSEM; *Chemicals Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems* - CREAMS; *Simulator for Water Resources in Rural Basins* - SWRRB; e *Soil and Water Assessment Tool* - SWAT.

Na última década vários modelos foram desenvolvidos para dar suporte para o uso da água, do solo e da cobertura vegetal na busca da exploração sustentável dos recursos naturais. Dessa forma, vários autores como Machado (2002), Santos e Silva (2007), Santos e Kobiyama (2008) e Aguiar Netto e Lucas (2010), usaram modelos hidrológicos para avaliar e auxiliar o planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos com os modelos SWAT, AÇUMOS, TOPMODEL e MIKE 11, respectivamente.

2.4 Modelo SWAT – Soil and Water Assessment Tool

O SWAT foi desenvolvido pelo USDA-ARS (United States Department of Agriculture-Agricultural Research Service), é um modelo matemático que permite que diferentes processos físicos sejam simulados na bacia hidrográfica, com o objetivo de analisar os impactos das alterações no uso do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, produção de sedimentos e qualidade da água, em bacias hidrográficas agrícolas não instrumentadas (NEITSCH et al, 2005).

Segundo Arnorld et al (1998) o modelo SWAT é do tipo distribuído, que incorpora as características de vários outros modelos, sendo um resultado direto do SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins). De acordo com Gassman et al. (2007) os modelos

específicos que contribuíram de forma significativa para o desenvolvimento do SWAT foram os modelos CREAMS (Chemicals, Runoff and Erosion from Agriculture Management Systems), GLEAMS (Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems); EPIC (Erosion-Productivity Impact Calculator) e o modelo ROTO (Routing Outputs to Outlet).

Desde sua criação no começo da década de 1990, o SWAT foi constantemente revisado, atualizado e expandido, desta forma aumentaram as potencialidades do modelo; dotando uma serie de ferramentas as quais aumentaram a aptidão deste modelo para lidar com uma vasta gama de problemas relacionados à qualidade e quantidade de água, fator fundamental quando se refere a ações de planejamento e gestão dos recursos naturais em bacias hidrográficas (ARNOLD, et al. 1998)

Embora, o modelo possua algoritmos para calcular diferentes constituintes dinâmicos de uma bacia hidrográfica, o modelo só conseguirá descrever estes processos se forem usados dados de entrada de qualidade. Os dados de entrada, que descrevem a estrutura física da bacia, são geralmente associados ao modelo através de uma interface SIG.

Segundo Arnold et al, 2012, o SWAT a partir do modelo digital de elevação permite que diferentes processos físicos sejam simulados em bacias hidrográficas. Possui o objetivo de analisar os impactos das alterações no uso do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, produção de sedimentos e qualidade da água em bacias hidrográficas agrícolas não instrumentadas. O modelo opera em intervalos de tempo diários e possibilita a simulação de muitos anos, porém, não permite a simulação de eventos isolados (SRINIVASAN E ARNOLD, 1994).

Os dados de entrada do modelo SWAT estão organizados para terem atributos espaciais. O modelo fornece três níveis espaciais: o de bacia hidrográfica, de sub-bacias e o de unidades de resposta hidrológicas ou HRUs. Para cada nível há um conjunto de parâmetros e dados de entrada para atribuição. O nível espacial maior, o de bacia hidrográfica, remete-se a toda área representada pelo modelo; o nível de sub-bacias remete-se às subdivisões da bacia-hidrográfica que são hidrologicamente conectadas. As sub-bacias são então subdivididas em HRUs, que são representação de áreas dentro das sub-bacias que apresentem características de solo, uso e ocupação do terreno e de declividades consideradas iguais.

Tanto as sub-bacias quanto as HRUs são definidas pelo usuário, ou seja, o usuário é quem define os parâmetros para tais subdivisões, desta forma fornecem aos usuários algum controle sobre os resultados obtidos pelo modelo SWAT.

O ciclo hidrológico nas simulações do SWAT é baseado na equação do balanço hídrico que relaciona a quantidade final de água no solo (SW_t); a quantidade inicial de água no solo (SW); o tempo (t); a precipitação diária (R_i); o escoamento superficial (Q_i); a evapotranspiração (ET_i); o escoamento lateral (P_i); o escoamento de retorno (QR_i); e o passo de tempo (i).

Para calcular o escoamento superficial ao tipo de solo o modelo utiliza uma formulação modificada do método da Curva Número – CN do Soil Conservation Service – SCS. Que relaciona o escoamento superficial diário; a precipitação diária e o parâmetro de retenção (S), o qual varia com a bacia em função do solo, uso do solo e declividade; assim como com o tempo, em função das alterações de umidade do solo.

O SWAT oferece três opções para estimativa da evapotranspiração potencial: Penman – Monteith, Hargreaves & Samani e Priestley – Taylor. O modelo determina a evapotranspiração pela soma da evaporação do solo e a transpiração da planta, ambas em função da evaporação potencial.

Para o cálculo da percolação usa uma técnica de propagação do armazenamento, que combina um modelo de fluxo em fendas para simular o escoamento através de cada camada de solo (ARNOLD et al. 2010). Os parâmetros usados para este cálculo são a umidade do solo no começo e fim do dia em milímetros (SW e SW_o); o intervalo de tempo em horas (Δt); o tempo de propagação através da camada i (TT) e o índice de identificação da camada do solo (i). Uma vez percolada abaixo da zona das raízes, este volume é armazenado como água subterrânea ou surge como escoamento de retorno à jusante do ponto considerado.

O modelo usa a Equação Universal de Perda de Solo Modificada – MUSLE, para simular a erosão, a qual é uma versão modificada da Equação Universal de Perda de Solo – USLE, desenvolvida por Wischmeier & Smith (1978). Enquanto na USLE usa índices de precipitação como indicativo de energia de erosão, a MUSLE usa a quantidade de escoamento superficial para simular a produção de sedimentos. Esta equação usa os seguintes dados: o volume de escoamento superficial em mm/ha (Q_{surf}); vazão de pico do escoamento em m^3/s (q_{peak}), a área das unidades de resposta hidrológicas em hectares ($área_{hru}$); o fator de

erodibilidade do solo (K_{USLE}), o fator de uso e manejo do solo (C_{USLE}), o fator de práticas conservacionistas (P_{USLE}) e o fator topográfico (LS_{USLE}).

A propagação no canal está dividida em duas componentes: a propagação da vazão líquida e a propagação da vazão sólida. Segundo Moro (2005), na primeira componente a operação se realiza com um passo de tempo diário, o qual permite simular tempos longos (50 – 100 anos) sobre bacias medianas ou grandes (1.000 a 10.000 km²). Os dados requeridos pelo modelo incluem o comprimento, declividade, profundidade, a taxa de escoamento e a velocidade média, estes dois últimos se calculam usando a equação de Manning.

A segunda componente, segue explicando Moro; dependem de duas operações simultâneas: a deposição e a degradação. A deposição no canal é baseada na velocidade de queda da partícula sedimentar e a degradação na força do escoamento. A qual está definida como um produto da densidade da água, taxa de escoamento e a declividade da superfície da água.

A calibração de um modelo segundo Christofolletti (1999), é o processo de estabelecer os parâmetros adequados de entrada e as condições internas do sistema, a fim de se verificar a adequação das respostas. Devido a complicações da abrangência de dados que usa o SWAT e o manejo destes para serem calibrados e validados, foi desenvolvida a ferramenta SWAT-CUP (Calibration and Uncertainly Procedures) para auxiliar no processo de calibração o qual pode ser feito manual ou automaticamente. O SWAT- CUP permite importar os arquivos de saída do SWAT no formato texto (TXT) economizando tempo e facilitando o processo de calibração e validação, uma vez que não serão necessárias a criação ou edição de tabelas. (ABBASPOUR et al, 2012)

Atualmente o modelo SWAT vem sendo usado em muitas regiões do Brasil por muitos pesquisadores para as mais diversas aplicações, na maioria dos casos voltadas à simulação de vazões líquidas e a produção de sedimentos. (MACHADO et al, 2003; BALDISSERA, 2005; LOPES, 2008; MARCHIORO, 2008; BLAINSKI et al, 2010; KUWAJIMA, 2012; UZEIKA et al, 2012; ARROIO JUNIOR et al, 2013; ANDRADE et al, 2013 e OLIVEIRA, 2014). Na literatura também pode-se encontrar trabalhos simulando diferentes cenários do uso da terra usando o modelo SWAT, avaliando e analisando os efeitos dessas mudanças (TIBEBE & BEWKET, 2010; LELIS et al, 2011; CARVALHO NETRO et al, 2011; PERAZZOLI et al, 2013; ARAGÃO et al, 2013)

No estado de Sergipe, Silva (2013) aplicou o modelo para estudar a dinâmica hidrossedimentológica do rio Poxim-Açu, determinando que a produção de água, sedimentos e nutrientes se relaciona diretamente com as práticas de manejo e uso do solo. Por outro lado Almeida (2013) aplicou o modelo para simulações preditivas na produção de água na bacia hidrográfica do rio Poxim-Açu indicando que o modelo é aplicável satisfatoriamente nos estudos do balanço hidrológico.

Machado (2013) usou o modelo para monitorar a bacia hidrográfica do rio Siriri, na qual indicou que a maior produção de água se localiza nas áreas de maiores declividades e que são ocupadas por florestas. Aragão (2014) avaliou a influência da mata ciliar na bacia do rio Siriri, sobre escoamento superficial e produção de sedimentos; no qual o modelo SWAT foi eficiente em simular o comportamento da bacia em face das mudanças de cenários de uso do solo, mostrando que a mata ciliar é um eficiente elemento para redução da carga de sedimentos.

Santana (2015) utilizou o SWAT para determinar o efeito da variabilidade de cenários de uso do solo sobre a dinâmica da vazão e de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Jacaré na região do Baixo São Francisco no estado de Sergipe, e Britto (2015), utilizou o modelo para avaliar o uso de agrotóxicos na bacia hidrográfica do rio Betume. De todos estes trabalhos obtém-se dados e informações importantes para o desenvolvimento das bacias antes supracitadas

O modelo SWAT também pode ser aplicado na avaliação de práticas de gestão e planejamento de bacias hidrográficas (JAYAKRISHNAN et al, 2005 e ZHANG, 2012) sendo uma ferramenta que permite importantes tomadas de decisões para o desenvolvimento das regiões.

3. METODOLOGIA DA PESQUISA

3.1 Área de Estudo

A área de estudo compreende a bacia hidrográfica do rio Betume, um dos tributários do rio São Francisco, localiza-se na região do Baixo do São Francisco, na zona leste do estado de Sergipe entre as coordenadas UTM 24L 720000, 770000 leste e 8820000, 8860000 sul (Figura 3.1) com uma área de 849,94 km². A maior parte da bacia está inserida nos municípios de Neópolis, Japaratuba, Pacatuba, Japoatã e Ilha das Flores, e abrange também parte dos municípios de Pirambú, Muribeca, Malhada dos Bois e São Francisco. (SERGIPE, 2014).

A bacia hidrográfica do rio Betume é caracterizado por um clima tropical semiúmido. A temperatura média anual é de 25° C com evaporação de 1500 mm anuais. A precipitação média anual na região varia de 500 a 1300 mm. O relevo da bacia é de colina e topos arredondados, se destaca a planície costeira com altitude inferior a 100 m e os tabuleiros do grupo Barreiras, com geologia composta principalmente por roxas metamórficas e sedimentares. (SERGIPE, 1997; SERGIPE, 2004).

Os solos predominantes na região são: Argissolos Vermelho Amarelo, Neossolos Quartzarênicos profundos não hidromórficos, Neossolos, Planossolos e Espodossolos (EMBRAPA, 2006). A bacia hidrográfica do rio Betume se encontra inserida no bioma da Mata Atlântica, conhecida também como Zona da Mata, faixa litorânea paralela ao Oceano Atlântico, a qual na atualidade se encontra muito degradada. (INFOESCOLA, 2015).

O rio Betume, chamado também de Aterro ou Poxim é um dos três principais afluentes da margem direita do rio São Francisco, convertendo-se numa das bacias hidrográficas importantes para o estado de Sergipe. A nascente principal do rio Betume está localizada próximo ao povoado Tiririca no município de Japaratuba (24L 0732594, 8827541 coordenadas UTM elev 91 m) a foz se encontra no município de Neópolis (24L 765581, 8850399 coordenadas UTM elev 6 m) O rio possui aproximadamente 148 km de extensão total, entretanto considera-se no presente estudo a extensão de 59,36 km em função da existência de uma estação fluviométrica. O rio Betume tem uma classificação 4 na ordem de Strhaler, coeficiente de compacidade 3,97 e vazão média anual 4,227 m³.s⁻¹ (AGUIAR NETTO et al. 2011).

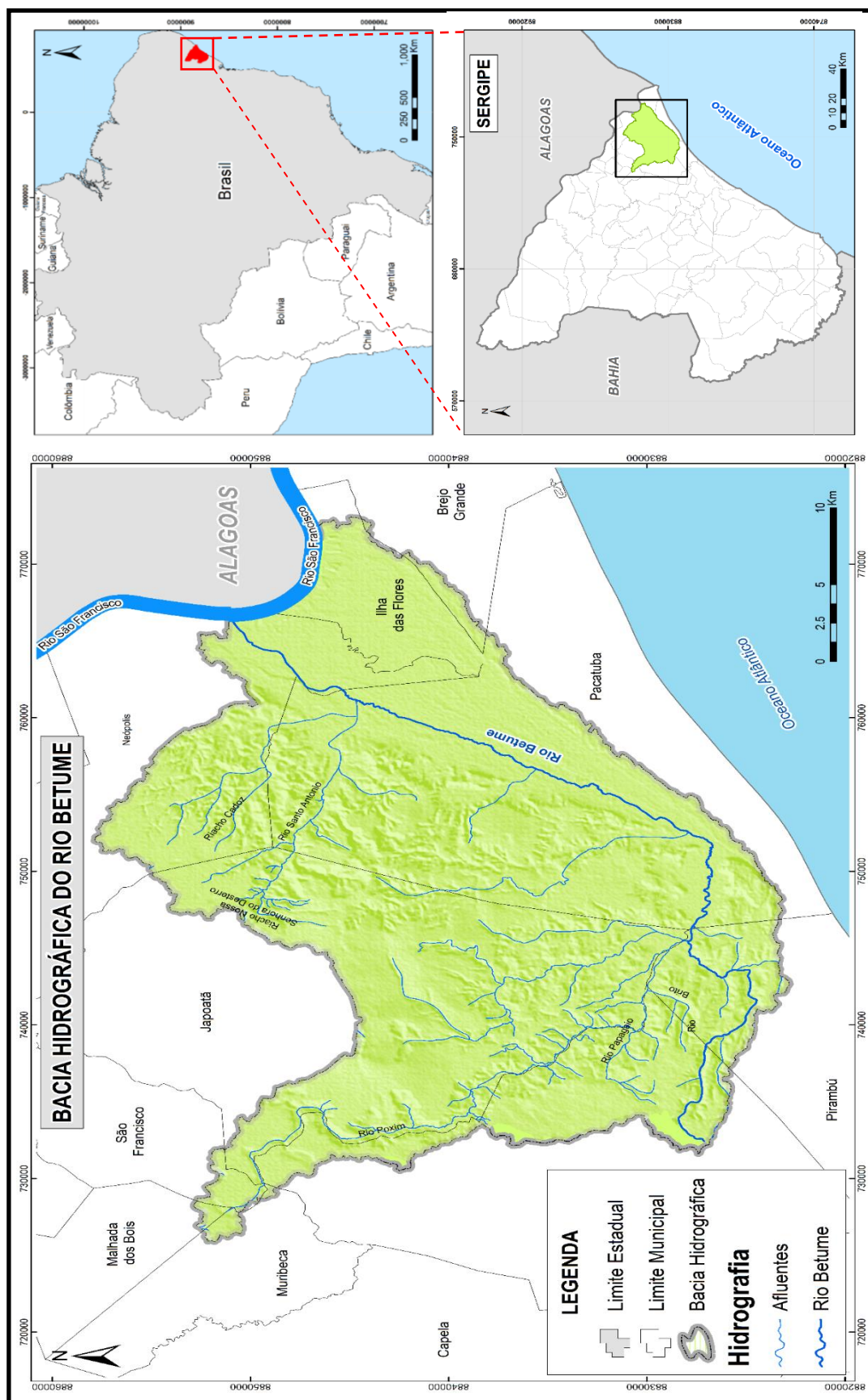


Figura 3.1 – Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Betume, em Sergipe e no Brasil.

Fonte: SERGIPE (2014) – Org.: R. C. Salazar.

A maior parte do corpo hídrico se encontra no município de Pacatuba e os seus principais afluentes do rio que estão localizados nos municípios de Japaratuba, Japoatã e Neópolis são: riacho Nossa Senhora do Desterro, riacho Cadoz, riacho Galante, riacho Timbó, riacho do Sapo, rio Papagaio, rio Poxim, rio Santo Antônio, rio São Francisco e rio do Brito. (Figura 3.1)

No recorrido feito na bacia hidrográfica do rio Betume, se observou que a área da bacia é caracterizada por uma distribuição geográfica aleatória, plantios de subsistência, e grandes cultivos de cana de açúcar, coco e frutais. O perímetro irrigado inserido na bacia tem o arroz como principal cultura. Apresenta também locais de exploração de petróleo e gás natural. A produção pecuária é também diversificada, sendo a criação bovina a mais importante. A área apresenta granjas para criação extensiva de aves destinadas ao abate e à produção de ovos.

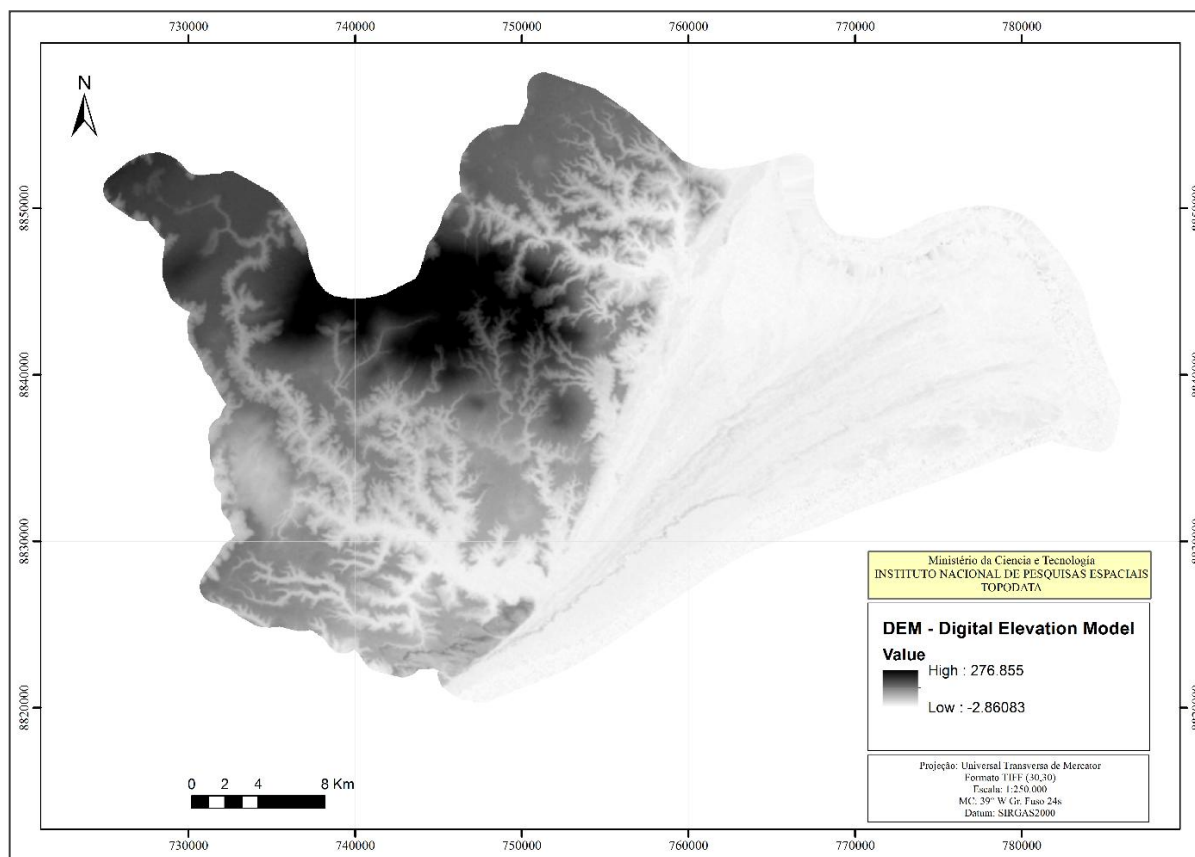
3.2 Dados de entrada no modelo SWAT

Para a simulação usando o modelo SWAT é necessário obter informações e dados hidroambientais, com a finalidade de formar uma base de dados espaciais (mapas) e séries temporais (dados diários) de algumas grandezas de dados climatológicos e características físico-hídricas do solo, necessários para a simulação da área de estudo neste modelo. Para tal, foram considerados os seguintes dados:

3.2.1 Modelo Digital de Elevação (DEM)

Para a confecção do Modelo Digital de Elevação (DEM), da Bacia Hidrográfica do Rio Betume, foi utilizada a folha SC.24-Z-B com articulação compatível com a escala 1:250.000 (INPE), produzido pela equipe da Embrapa Monitoramento por Satélite (SRTM), elaborados e ajustados pelo Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil (TOPODATA) que passou a disponibilizar estes dados altimétricos de todo território nacional do Brasil. Os modelos estão em Sistema de Coordenadas Geográficas e Datum WGS84 com resolução de 30 metros como se mostra na Figura 4.2 (VALERIANO, 2008). A partir do DEM será feito o delineamento da bacia hidrográfica do rio Betume, no sistema de projeção SIRGAS 2000 UTM, zona 24S

Figura 3.2- Modelo Digital de Elevação da bacia hidrográfica do rio Betume



Fonte: INPE – TOPODATA (2014)

3.2.2 Amostras do Solo, Mapas do solo e do Uso do Solo

Para as análises do solo, as coletas de amostras da região do Betume, adotou a metodologia estabelecida pela EMBRAPA (1997). A classificação dos solos pertencentes à área de estudo, se fez de acordo com EMBRAPA (2006). Se escolheram 5 pontos de amostragem: Ponto 1, solo próximo da nascente principal do rio Betume. Ponto 2, solo com plantações de coco e cana de açúcar. Ponto 3, solo com cobertura de floresta e pastagem e os Pontos 4 e 5, solos na área do perímetro irrigado com plantios de arroz. (Figura 3.3)

As amostras de solos nos pontos antes supracitados, deformadas e indeformadas, foram coletadas em uma camada na profundidade de 0,0 – 0,15 m. Estas amostras foram encaminhadas ao Laboratório do Instituto Tecnológico de Pesquisas de Sergipe (ITPS), para a determinação dos parâmetros exigidos pelo modelo SWAT.

Os parâmetros físico-hídricos determinados no laboratório foram: densidade do solo, micro, macro e porosidade total do solo, e humidade, assim como a análise granulométrico, quantidade de areia, silte e argila para determinação da textura. Foram também determinadas a condutividade elétrica, percentagem de carbono orgânico, água disponível, albedo e condutividade hidráulica, como se apresenta no anexo A.

A estimativa da erodibilidade (K_{USLE}), o qual é usado para expressar a capacidade de produção de sedimentos da bacia, tem sido calculado pela equação 1 (NEITSCH, et al. 2011)

$$K_{USLE} = f_{areia} \cdot f_{cl-si} \cdot f_{orgc} \cdot f_{amax} \quad (1)$$

em que:

f_{areia} é fator de baixa erodibilidade de solos com elevados índices de areia grossa,

f_{cl-si} é o fator de baixa erodibilidade de solos com altas taxas de silte e argila,

f_{orgc} é o fator que reduz a erodibilidade de solos com altos teores de carbono orgânico e

f_{amax} é o fator que reduz a erodibilidade dos solos com altos teores de areia.

Estes índices são calculados por meio das equações 2, 3, 4 e 5 respectivamente.

$$f_{areia} = \left\{ 0,2 + 0,3 \exp \left[-0,256 m_s \left(1 - \frac{m_{silt}}{100} \right) \right] \right\} \quad (2)$$

$$f_{cl-si} = \left(\frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}} \right)^{0,3} \quad (3)$$

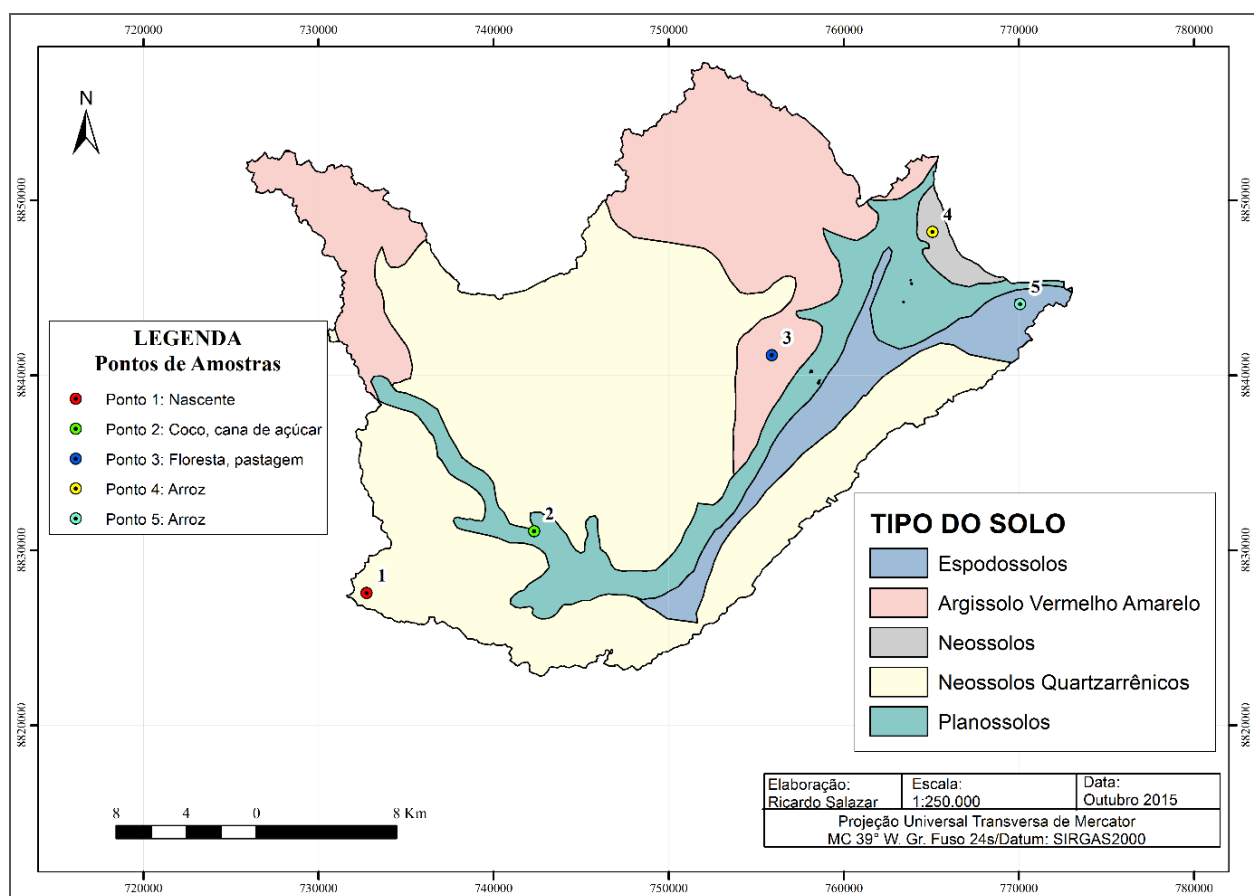
$$f_{orgc} = \left[1 - \frac{0,25 \cdot orgC}{orgC + \exp(3,72 - 2,95 \cdot orgC)} \right] \quad (4)$$

$$f_{amax} = \left\{ 1 - \frac{0,7 \left(1 - \frac{m_s}{100} \right)}{\left(1 - \frac{m_s}{100} \right) + \exp \left[-5,51 + 22,9 \cdot \left(1 - \frac{m_s}{100} \right) \right]} \right\} \quad (5)$$

em que: m_s é o porcentual de areia; m_{silt} é o porcentual de silte; m_c é porcentual de argila e $orgC$ é o porcentual de carbono orgânico na camada.

De acordo com o atlas digital de recursos hídricos de Sergipe (Figura 3.3) na bacia hidrográfica do rio Betume os tipos de solos são o Argissolo Vermelho Amarelo representando 39,39% encontra-se em áreas com elevações entre 30 a 90 m com relevo ondulado. o Neossolo Quartzarrênico profundo não hidromórfico representando 46,31% da bacia, tem sua ocorrência em todo o relevo da bacia. Os solos Planossolos, representa 9,49% são inundados margeando o curso do rio Betume e os solos Espodossolo (3,94%) e Neossolo (0,87%) se encontram na planície da bacia.

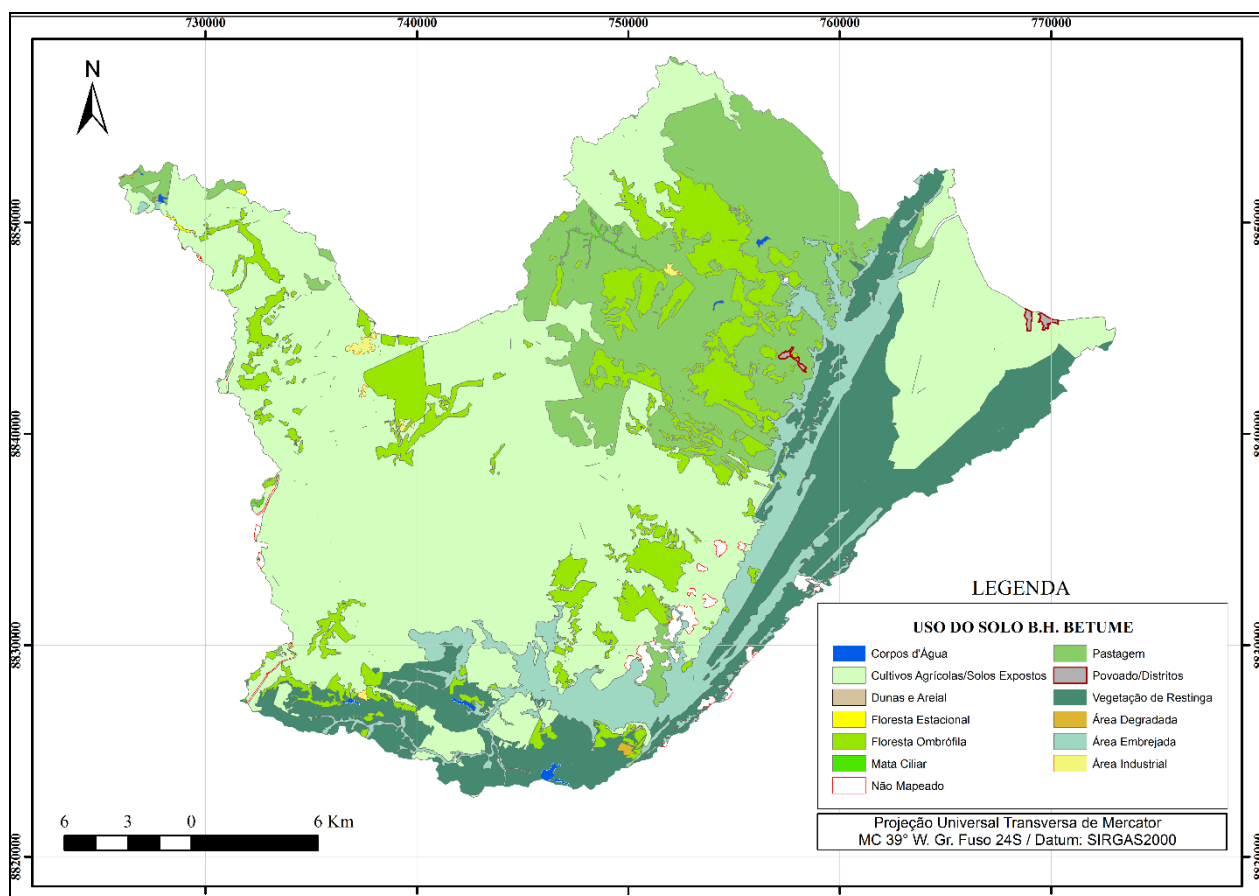
Figura 3.3- Tipos do Solo e Pontos de Amostragem na bacia hidrográfica do rio Betume



Fonte: SERGIPE (2014); EMBRAPA (2006).

Os dados vetoriais do uso da terra se obtiveram do atlas digital de Sergipe (2014) como se mostra na Figura 3.4, onde em relação ao uso e ocupação do solo, a vegetação predominante na bacia é a Mata Ciliar (0,97%) vegetação de Restinga (10,34%), Floresta Ombrófila (5,99%) e Floresta Estacional (0,18%). A pastagem ocupa 39,98% da bacia e os cultivos agrícolas 33,53%. A área embrejada 4,19%, Área Industrial 0,09%, Área degradada 0,10% e ocupações urbanas 0,04%.

Figura 3.4 – Mapa de uso da terra da bacia hidrográfica do rio Betume



Fonte: SERGIPE (2014)

3.2.3 Monitoramento da Vazão

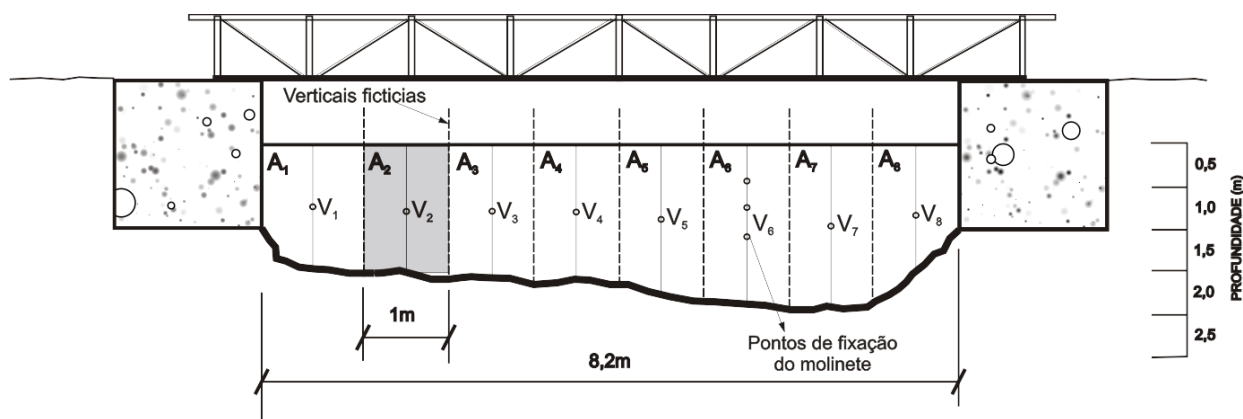
A metodologia de monitoramento escolhida nesta pesquisa, consiste em realizar a batimetria de uma seção transversal do rio Betume e depois mensurar a velocidade da água por meio do molinete hidráulico, que é um dos métodos mais difundidos, de fácil manuseio, fácil transporte e baixo custo (CHOW, 1994; USDI, 2001; CÔRREA, 2008). A batimetria do rio se realizou no primeiro ponto de monitoramento à montante do rio, (Figura 3.6-A)

localizado no município de Pacatuba, no Ponte Serigy (24L 752071, 8827032) de 8,20 m de largura.

A vazão do rio em $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Q) foi obtida através da integração do produto da velocidade média do fluxo em $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (V_i) pela área abrangida em m^2 (A_i) (CÔRREA, 2008), representada na Equação 6. Para determinar a área do rio, se dividiu a largura em segmentos com espaçamento de 1m obtendo-se 8 seções (GOMES e SANTOS, 2003). As profundidades de cada seção foram medidas com uma régua, e a velocidade foi determinada com a utilização do molinete modelo FP 111 da marca Global Water, com sensor turbo hélice, telescópico, de leitura digital e $0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ de precisão (GLOBAL WATER, 2009); se fizeram três medidas de velocidade (0,2; 0,6 e 0,8 m) na vertical de cada segmento (ALMEIDA JUNIOR et al, 2010; CARVALHO, 2008), conforme se mostra nas Figuras 3.5 e 3.6 – B, C, D, E.

$$Q = \sum Q_i = \sum A_i \cdot V_i \quad (6)$$

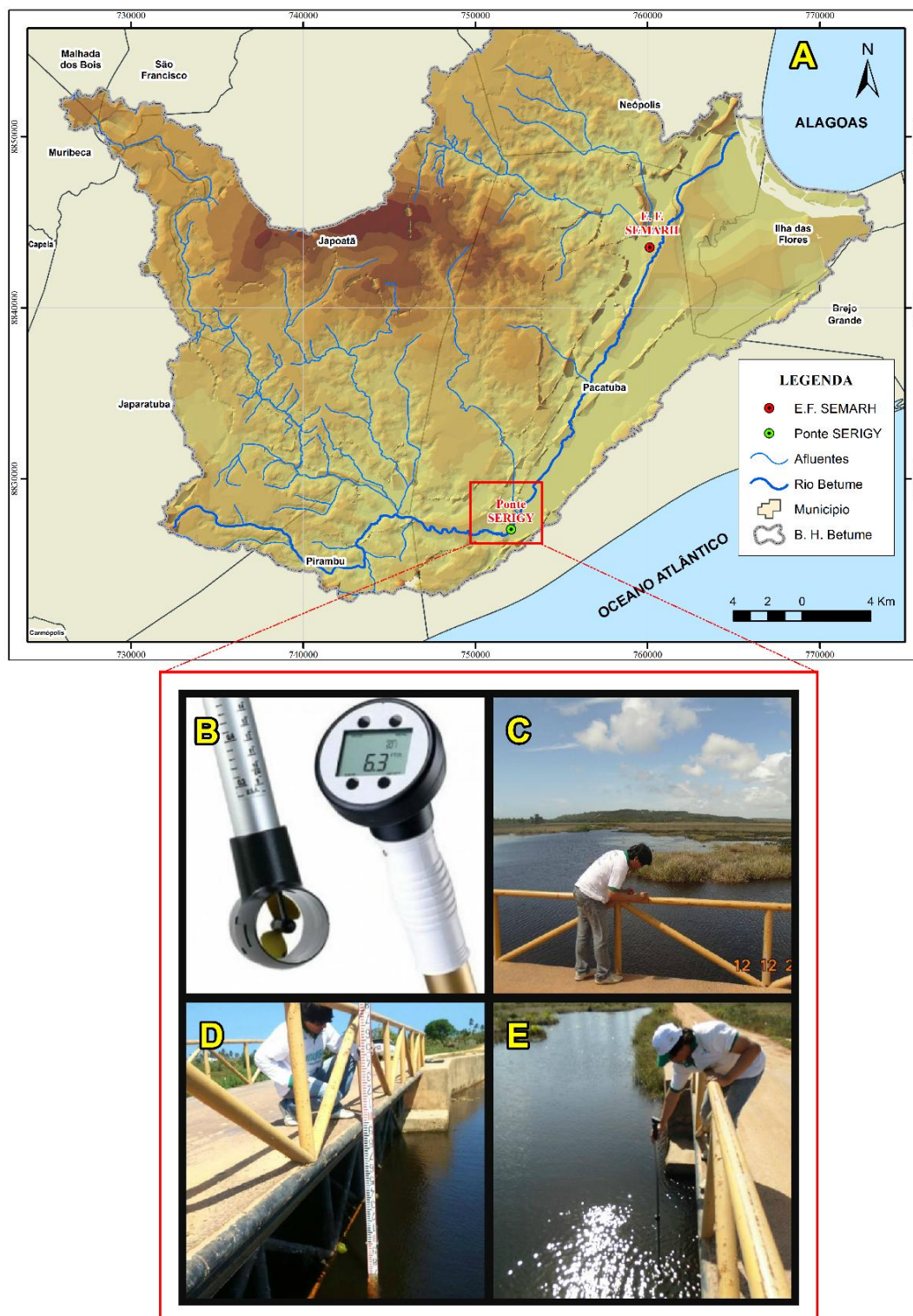
Figura 3.5 - Perfil da seção transversal à montante do rio na Ponte Serigy, formado com a largura e as profundidades para a determinação da vazão do rio Betume.



Fonte: Autor

O ponto considerado na jusante do rio Betume, foi a estação fluviométrica código 49744000 (Latitude-10:28:10, Longitude -36:37:41) da SEMARH, localizada no município de Pacatuba no povoado Alagamar, que se usou como exutório para a modelagem (Fig. 3.6-A).

Figura 3.6 – A: Mapa pontos de monitoramento da vazão. B: molinete, C: medição da largura, D: medição da profundidade e E: medição da velocidade.



Fonte: SERGIPE (2014), Projeto Aguas do São Francisco (2014).

As medidas de vazões realizadas no Ponte Serigy se realizaram durante a época seca (outubro a fevereiro) e a época chuvosa (março a setembro) dos anos 2014 e 2015. Na estação fluviométrica da SEMARH foram considerados dois anos de dados de vazão diárias (outubro/2012 a setembro/ 2014), utilizados para a calibração do modelo

3.2.4 Dados Climáticos

Os dados climáticos são necessários em dois momentos da modelagem, o primeiro é na parametrização da Estação de Geração Climática do SWAT, o qual estima os dados faltantes de clima de forma automática quando não se dispõe de registros climáticos. No segundo momento já é na realização propriamente dita da execução da modelagem com o modelo SWAT (ALMEIDA, 2013).

Na presente pesquisa os dados necessários para os cálculos dos parâmetros foram obtidos a partir das series históricas oferecidas nas estações meteorológicas convencionais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) em Propriá nas coordenadas UTM 24L 736626; 8870574 e Altitude: 19.92 m e Pão de Açúcar nas coordenadas 24L 672215; 8921824 e Altitude: 21 m. E pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) as estações de Japarutuba nas coordenadas UTM 24L 724579; 8846893 e Neópolis nas coordenadas 24L 762676; 8836453.

Da estação de Propriá obteve-se os dados de radiação solar ($\text{MJ. m}^2. \text{dia}^{-1}$), temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$), temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$), velocidade média do vento (m.s^{-1}), e umidade relativa média (%). Em quanto aos dados diários de Precipitação (mm) obtiveram-se de todas as estações. Os dados das series históricas de todas as estações, foram analisados quanto a incidência de falta de dados nos seus registros e selecionados 16 anos de amostragem (1999 – 2014). Estes dados se usaram para simular o clima da bacia hidrográfica do rio Betume, através do Gerador Climático do SWAT (Ver anexo B).

3.3 Modelagem

A partir dos dados apresentados anteriormente, realizou-se os passos de entrada dos mesmos na parametrização inicial do modelo. Usando o DEM (Modelo de Elevação Digital) o SWAT determina a direção do fluxo da rede de drenagem (rios principais e secundários) gerando pontos de “saídas” para este caso se adicionou o exutório na jusante do rio Betume, nas coordenadas UTM 24L 759642, 8841706, que correspondem a estação fluviométrica da

SEMARH, a partir do qual se inicia a delimitação da bacia, ao mesmo tempo que o modelo delimita a bacia a divide automaticamente em subbacias tendo como referência a quantidade de “saídas” ao longo do rio na área delimitada. (GALVAN et al., 2009; KUWAJIMA, 2012; SILVA, 2012)

Na etapa de processamento Análise e Definição de HRU's (Unidade de Resposta Hidrológica), é onde o SWAT determina os parâmetros hidrológicos de cada sub-bacia, para isto se fez a inserção das camadas vetoriais de uso do solo, o tipo do solo e declividade. Assim, os tipos de uso da terra identificados na bacia hidrográfica do rio Betume deverão estar associados às categorias presentes no banco de dados do uso e ocupação da terra do SWAT, de acordo com suas semelhanças conceituais e estruturais como se mostra na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Associação do uso e ocupação da terra na bacia hidrográfica do rio Betume compatível com o banco de dados do SWAT.

VALUE	USO DA TERRA	SWAT	
0	Corpos d'agua	WATR	CROP
1	Cultivos agrícolas / Solos expostos	AGRL	CROP
2	Dunas e areal	COCO	CROP
3	Floresta estacional	FRST	CROP
4	Floresta ombrófila	FRSD	CROP
5	Mata ciliar	FRSD	CROP
6	Não mapeado	RICE	CROP
7	Pastagem	PAST	CROP
8	Vegetação e restinga	RNGB	CROP
9	Povoado / Distritos	URBN	URBAN
10	Área degradada	UTRN	URBAN
11	Área embrejada	WETL	URBAN
12	Área industrial	UIDU	URBAN

Fonte: Adaptado de Santos (2011) e SWAT (2012)

Para os tipos de solo, cadastrou-se os Argissolos Vermelho Amarelo, Neossolos Quartzarênicos, Neossolos, Planossolos e Espodossolos Para a declividade as categorias foram estabelecidas de acordo com EMBRAPA (2006) em 4 classes: 0 a 3% (relevo plano), de 3 a 8% (suave ondulado), de 8 a 20% (ondulado) e de 20 a 45% (fortemente ondulado). Assim o SWAT cria um novo mapa de solos redefinidos.

Para a definição das HRU's o SWAT permite estabelecer faixas de corte entre Tipo de solo, Uso do Solo e Declividade, os valores determinados foram de 10%, 20% e 10% respectivamente. Estas faixas de porcentagem também foram usadas por Machado (2002), Boskidis et al. (2012) e Silva (2013).

Definidas as HRU's da bacia, é requerida a localização das estações meteorológicas e do gerador climático, as quais foram obtidas conforme se indica no item 3.2.4. Os dados climáticos foram inseridos mediante a ferramenta 'Inserção de Tabelas' (Write Input Tablets) > 'Estação Meteorológica' (Weather Station), na qual disponibiliza cinco abas para inserir os arquivos em formato de texto (.txt) referentes a radiação solar, umidade relativa, temperaturas máxima e mínima, velocidade do vento e precipitação.

Após terem finalizado todas essas etapas requeridas pelo modelo, se realizou a etapa final rodando-se o modelo para realizar a simulação da vazão, gerando o 'resultado padrão' do modelo; do período 01/01/1999 a 30/12/2014. Neste trabalho se adotou o mesmo procedimento feito por Peterson e Hamlet (1998), White e Chaubey (2005), Oliveira et al. (2006), Almeida (2013) e Oliveira (2014), os quais usaram a prática de separação dos três primeiros anos de simulação, visando o aquecimento do modelo. Este procedimento é feito para estabilizar as condições iniciais da umidade do solo (CARVALHO NETO et al. 2011).

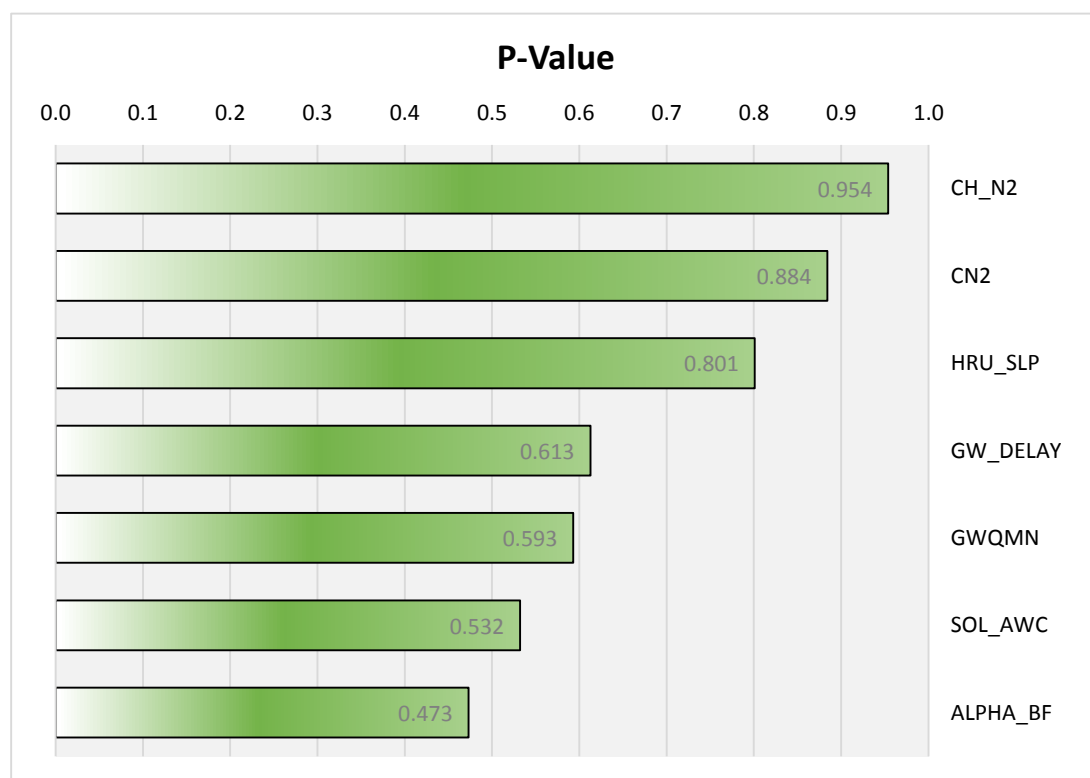
3.4 Análise de Sensibilidade, Calibração e Validação dos Parâmetros

Para a Análise de Sensibilidade se usou o software SWAT-CUP, usado também por Yang et al. (2008), Strauch et al. (2012), Rouholahnejad et al. (2012), Rocha (2013) e Oliveira (2014). O método analisou as incertezas dos parâmetros com o fator-P, que é o percentual de dados observados dentro de 95% de previsão de incerteza (95PPU), tendo como função objetivo o coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe (NS), R^2 , PBIAS e RSR (ABBASPOUR, 2012).

A Análise de Sensibilidade permite identificar os parâmetros mais sensíveis e que alteram a variável que se deseja calibrar no modelo, e serve como ajuda e guia para futuras pesquisas conforme sugerido por Lelis et al. (2012), Cibin et al. (2010) e também Baltokoski et al. (2010). Os parâmetros selecionados foram 7 indicados como os mais sensíveis na simulação de vazões em diversos trabalhos (van GRIENSVEN et al., 2006; LELIS, 2001; STRAUCH et al, 2012; ALMEIDA, 2013; SILVA, 2013; OLIVEIRA, 2014), dos quais os mais sensíveis foram Coeficiente de rugosidade de Manning (CH_N2), número de curva

(CN2), declividade média (HRU_SLP), Tempo de retardo do fluxo subterrâneo (GWDELAY), profundidade limite de água no aquífero raso para o escoamento de base (GWQMN), capacidade de água disponível no solo (SOL_AWC) e constante de recessão de escoamento de base (ALPHA_BF), como se mostra na Figura 3.7, onde são definidos os limites inferior e superior de cada parâmetro (Tabela 3.2), a partir de um valor inicial (ABBASPOUR, 2012).

Figura 3.7 – Parâmetros mais sensíveis determinados no SWAT-CUP para modelagem do rio Betume



Fonte: SWAT-CUP (2012)

Conforme Green e van Griensven (2008) e também Oliveira (2014), finalizada a fase de análise, se calibra o modelo com os parâmetros identificados como os mais sensíveis, os dados usados para a calibração compreende o período 2012 a 2013 da estação da SEMARH. A aplicação do SWAT-CUP, seguiu a metodologia descrita por Abbaspour (2012), processo no qual vai se alterando o valor, levando em conta o limite superior e inferior, de um parâmetro por vez a cada simulação até encontrar valores estatísticos aceitáveis entre dados observados e dados simulados.

Para validar o modelo, os parâmetros já calibrados na etapa anterior, foram mantidos constantes. Nesta etapa se usaram os dados de vazão no período 2014 a 2015, realizando-se uma última simulação de vazões com o SWAT. Os resultados do período de validação do modelo também foram analisados utilizando os índices estatísticos conforme se apresenta na Tabela 3.3.

Tabela 3.2 – Parâmetros e limites dos parâmetros usados na análise de sensibilidade

PARÂMETROS	DESCRIÇÃO	UNIDADES	LÍMITES		MÉTODO DE VARIAÇÃO
			Min	Max	
CN2	Número da curva na condição II de umidade	adimensional	-0.2	0.2	Multiplicar
ALPHA_BF	Constante de recessão do escoamento de base	dias	0	1	Igualar
GW_DELAY	Tempo de retardo do fluxo subterrâneo	dias	30	450	Igualar
GWQMN	Profundidade limite de água no aquífero raso para o escoamento de base	metros	0	2	Igualar
CH_N2	Coefficiente de rugosidade de Manning (n) para o canal principal	adimensional	0	0.3	Igualar
HRU_SLP	Declividade media (influencia no fluxo lateral e no tempo de concentração)	m.m ⁻¹	0	0.2	Igualar
SOL_AWC	Capacidade de água disponível no solo	mm H ₂ O. mm solo ⁻¹	-0.2	0.4	Multiplicar

Fonte: Adaptado de Silva (2013)

No processo para analisar as respostas do modelo se usaram comparação gráfica e os critérios estatísticos utilizados por Machado (2002), Moro (2005), Moriasi et al. (2007), Almeida (2013), Silva (2013) e Oliveira (2014). Os quais consideram muito importante o Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NS) (Equação 7), este coeficiente pode variar a partir de negativo infinito a 1, sendo 1, indicativo de um perfeito ajuste.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (7)$$

em que:

O_i = evento observado,

S_i = evento simulado pelo modelo,

\bar{O} = media do evento observado no período de simulação e

n = número de eventos.

Outro critério utilizado foi, o Coeficiente de Determinação R^2 (Equação 8), o qual descreve a razão de dispersão dos dados simulados em torno da média dos valores observados indicando a proporção da variância total dos dados observados com os dados simulados. Os valores de R^2 variam de 0 a 1, valores maiores a 0,5 são considerados satisfatórios (MORIASI et al, 2007; GREEN e van GRIENSVEN, 2008).

$$R^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S}) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2} \quad (8)$$

em que:

O_i = evento observado no período analisado

S_i = evento simulado no período.

i = sequência de serie temporal dos pares medidos e simulados.

n = número de pares das variáveis medidas e simuladas.

Como últimos critérios se usaram o Percentual de Tendências (PBIAS) e a Razão entre o Erro Padrão Médio e o Desvio Padrão das Observações (RSR), os quais como menciona Moriasi et al. (2007) se destacam nas técnicas de avaliação estatística em pesquisas de aplicabilidade do SWAT. O índice PBIAS (Equação 9) indica a tendência média dos dados simulados em serem maiores ou menores do que os dados observados. Se o valor é zero o PBIAS se considera ótimo. Valores com baixa magnitude indicam acurácia na simulação do modelo, enquanto os valores positivos indicam superestimação (MORIASI, 2007).

Já o índice RSR como se mostra na Equação 10, - donde RMSE é a raiz quadrada do erro quadrático médio e STDEV é o desvio padrão - é uma versão padronizada que inclui uma estatística de erro; o valor considerado como ótimo para o RSR é zero, o qual indica uma simulação perfeita. Quer dizer que enquanto o valor RSR é menor, melhor é o desempenho da simulação do modelo (MORIASI, 2007; OLIVEIRA, 2014).

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i) \cdot 100}{\sum_{i=1}^n O_i} \right] \quad (9)$$

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \left[\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \right] \quad (10)$$

Segundo Silva (2013) citando a Loague e Green (1991) não existe um padrão de valores destas medidas estatísticas para julgar o desempenho do modelo como aceitável. Neste caso se usaram os intervalos propostos por Moriasi et al. (2007) e Silva (2013). Os resultados da simulação foram considerados aceitáveis de acordo com NS, R^2 , RSR e valores PBIAS (Tabela 3.3), levando em consideração os intervalos máximos e mínimos para manter os valores de saída razoáveis.

Tabela 3.3 – Critérios de avaliação de desempenho de modelos hidrológicos e suas respectivas classificações.

CLASSIFICAÇÃO	NS	RSR	PBIAS (vazão)	R^2
Muito bom	$0.75 < NS \leq 1.00$	$0.00 \leq RSR \leq 0.50$	$PBIAS < \pm 10$	$R^2 > 0.50$
Bom	$0.65 < NS \leq 0.75$	$0.50 \leq RSR \leq 0.60$	$\pm 10 \leq PBIAS < 15 \pm$	
Satisfatório	$0.50 < NS \leq 0.65$	$0.60 \leq RSR \leq 0.70$	$\pm 15 \leq PBIAS < 25 \pm$	
Insatisfatório	$NS \leq 0.5$	$RSR > 0.70$	$PBIAS \geq \pm 25$	

Fonte: Adaptado de Moriasi et al. (2007) e Silva (2013).

3.5 Construção de Cenários

Os cenários objetivaram-se em relação a problemática hídrica do perímetro irrigado do Betume e o desmatamento para favorecer a crescente agricultura da região do Baixo São Francisco, na qual mediante o projeto Aguas do São Francisco, se desenvolveram atividades

para reflorestar as matas ciliares nas margens do rio Betume visando garantir a regularização da produção de água na bacia. (AGUIAR NETTO, et al. 2015).

Silva et al (2015) na caracterização macroscópica do estado de impacto ambiental das nascentes do rio Betume, determinou que das 6 nascentes observadas e analisadas encontram-se em um estado de conservação razoável. Porém, a principal nascente do rio Betume, sofreu o maior impacto antrópico, onde é claro que não se cumpre com a lei do Código Florestal vigente.

Para simular os cenários se usou a metodologia adotada por Carvalho Netto et al (2010) e Silva (2013), a qual consiste em modificar a curva número ajustando o valor para diferentes usos da terra. O modelo SWAT usa a curva número (CN) para modificar a condição de humidade no solo para estimar assim o escoamento superficial (NEITSCH et al, 2005).

Os cenários considerados estão em função ao uso e ocupação da terra para identificar suas diferenças e influencia na produção de água e sedimentos. Se fizeram três situações distintas considerando a área de estudo e levando em conta os parâmetros calibrados do modelo, uma vez que a calibração e validação foram satisfatórios

CENARIO 1: Uso atual do solo na bacia hidrográfica do rio Betume, mantendo-se as práticas agrícolas atuais das áreas em uso. Com valor médio da curva número de 71,9

CENARIO 2: Cobertura vegetal nativa (Floresta mista), simulando uma reflorestação das áreas de uso agrícola. Para este cenário se usou CN igual a 55

CENARIO 3: O avanço das culturas predominantes (arroz, cana de açúcar e pastagem), simulando uma deflorestação ampliando o uso da área agrícola. Neste caso o valor da curva número foi de 77.

Com os valores da curva número para cada cenário, se iniciou o processamento dos dados no modelo SWAT, escolhendo logo as sub-bacias, uso e ocupação da terra, tipo do solo e a declividade do terreno, para simular cada cenário.

Nesse contexto se simularam cenários no intuito de procurar a situação mais favorável a manutenção sustentável de uso e ocupação das terras da bacia hidrográfica do rio Betume, e para garantir a quantidade e qualidade da água com níveis aceitáveis que não implique em prejuízo a atividade para a qual é destinada.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Monitoramento da Vazão

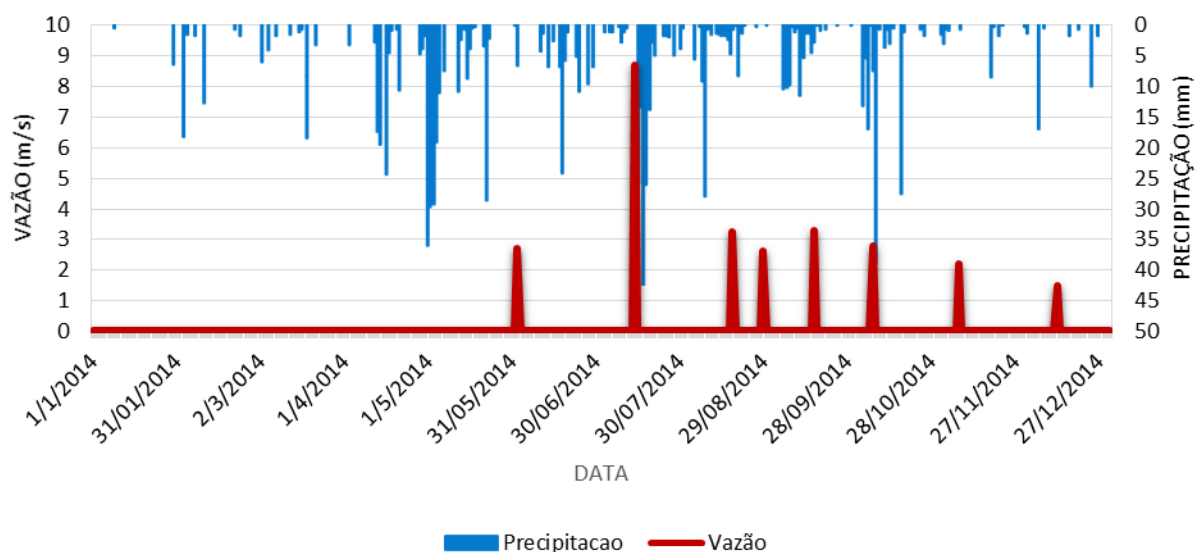
No presente estudo se usou a série de dados de precipitação do ano 2013 e 2014 da estação de Propriá. Na Tabela 4.1 se amostram as medições de vazão no período junho/14 a agosto/15. Observando-se o gráfico da Figura 4.1, pode-se constatar uma adequação satisfatória para os resultados medidos em campo, mas é importante salientar que a estação de Propriá foi a única em ter dados pluviométricos diários de todo o ano 2014. Os dados de vazão medidos em campo, foram úteis para mostrar o comportamento do rio no ponto de monitoramento da Estação do Ponte Serigy.

Tabela 4.1 – Dados de vazão medidos na estação Ponte Serigy no rio Betume

Data	Vazão (m³/s)
02/06/14	2.71
14/07/14	8.69
18/08/14	3.25
29/08/14	2.63
16/09/14	3.28
07/10/14	2.79
07/11/14	2.22
12/12/14	1.48
15/01/15	1.25
22/01/15	0.70
04/02/15	0.89
11/02/15	0.68
27/02/15	1.72
04/03/15	0.75
13/03/15	1.69
27/03/15	0.69
10/04/15	0.75
15/05/15	0.77
12/06/15	2.68
14/07/15	4.79
24/07/15	3.17
03/08/15	5.29

Fonte: Autor

Figura 4.1 – Hidrograma para avaliação dos resultados do monitoramento da vazão do rio Betume na estação Ponte Serigy.

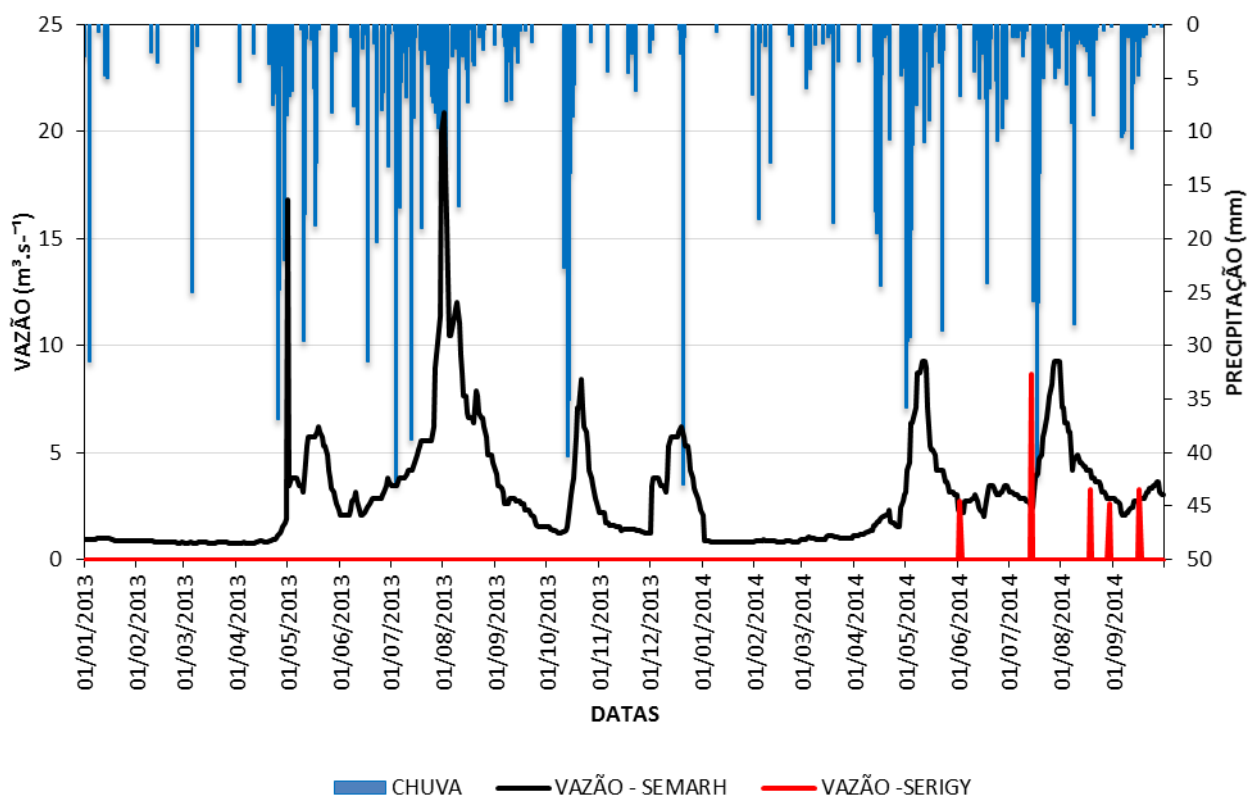


Fonte: Autor

Como pode-se observar no hidrograma na Figura 4.1, a vazão de pico ($8,69 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) coincide com a época chuvosa no mês de julho, já para a época seca, nos meses de setembro a dezembro os valores de vazão são menores. No mês de dezembro a vazão mínima registrou um valor de $1,48 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. As medições de vazão se realizaram no mês de junho a dezembro/2014 e serviram para ver o comportamento da bacia hidrográfica do rio Betume em relação aos dados pluviométricos da estação nos meses de junho a dezembro nesse ano.

No hidrograma da Figura 4.2 na série histórica dos dados da SEMARH de jan/2013 a set/2014; na época chuvosa (abril a agosto/2013) se observa que os picos de vazão coincidem com os picos de precipitação. No primeiro dia do mês de maio do ano 2013 a vazão alcançou o valor máximo ($16,82 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) com uma precipitação apenas de 5,6 mm para esse dia, o que pode ser explicado respeito a este fato, é que os dias anteriores se registraram precipitações de 36,9; 24,8; e 22 mm nos dias 25, 26, e 29 de abril/2013 respectivamente. Tendo em consideração que o tipo de solo na bacia em sua maioria são solos Neossolos, caracterizados por serem arenosos não hidromórficos e de permeabilidade média (EMBRAPA, 1999) e uma precipitação que ocorre quando o solo está úmido devido a uma chuva anterior, terá maior facilidade de escoamento

Figura 4.2 – Hidrograma das estações de monitoramento Ponte Serigy e SEMARH



Fonte: Autor

No outro pico de vazão da época chuvosa ocorre no mês de julho/2013 que alcança um valor de $19,98 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ com uma precipitação de 15,8 mm, produto como se explicou, de ocorrência de chuvas anteriores. Para a época seca (setembro/2013 a março/2014), se registraram picos de vazão de 8,43 e $5,31 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ com precipitações de 40,3 e 40 mm respectivamente. No segundo período chuvoso (abril a agosto/2014) dessa serie se registraram dois picos de vazão de 8,98 e $9,26 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ para precipitações de 35,8 e 42,2 mm respectivamente.

Os valores medidos referentes às cotas e respectivas vazões para a seção do rio Betume da E.F. SEMARH, se apresentam no anexo C, com a qual se gerou a Curva-Chave do rio. Para isto se aplicaram o modelo de regressão polinomial (11) e exponencial (12) do software Excel aos dados tabulados obtendo as respetivas equações de regressão da curva chave do rio Betume (Figura 4.3).

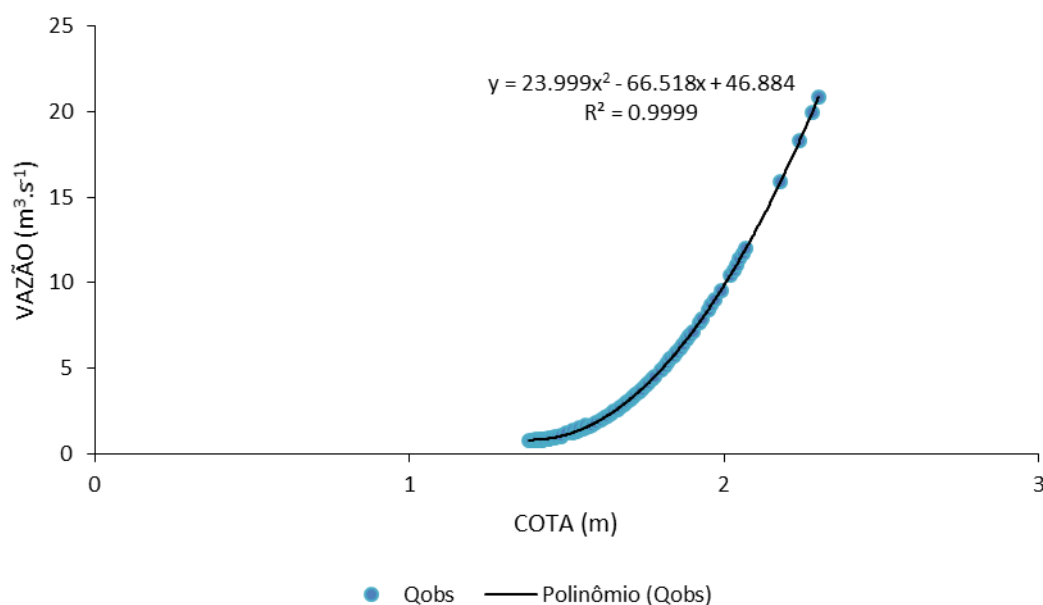
Para determinar a equação da curva chave a partir da equação exponencial se usou a metodologia proposta por Porto, Zahed Filho e Silva (2001), os parâmetros de ajuste foram calculados a partir dos pares (Q, h) a expressão geral é linearizada determinando-se a e b por regressão linear e h_0 por tentativa e erro. Utilizou-se a ferramenta Solver do Excel.

$$Q = 23,999h^2 - 66,518h + 46,884 \quad (11)$$

$$Q = 11,28(h - 1,05)^{2,83} \quad (12)$$

em que: Q é a vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) e
 h é o nível da régua (m)

Figura 4.3 – Curva chave da vazão para o rio Betume



O coeficiente de correlação (R^2) entre a vazão observada e a calculada, através da equação exponencial de 0,99, indicando alta correlação positiva entre as variáveis. Considerando a equação polinomial e o coeficiente entre variáveis de 0,99 mostrando também uma alta correlação entre os dados observados e calculados. Aplicou-se também o Coeficiente de Nash-Sutcliffe, NS (Equação 7), o qual varia desde o negativo infinito até um, sendo este último o indicativo de que o modelo alcançou um ajuste perfeito (LINO et al., 2009).

Os valores do NS encontrados para as duas situações de determinação da curva-chave, regressão polinomial e exponencial, 0,99 em ambos casos. Estes resultados indicam um ajuste perfeito das equações utilizadas para os pares de valores de cota e vazão. Os valores do coeficiente de eficiência $NS > 0,4$ e coeficiente de determinação, $R^2 > 0,5$ indicam o desempenho muito bom do modelo (GREEN e van GRIENSVEN, 2008).

Silva (2013) encontrou valores de R^2 e NS de 0,96 e 0,93 respectivamente para as duas situações de determinação da curva-chave, regressão polinomial e exponencial, do rio Poxim-Açu. No anexo D são apresentados os valores de vazão calculada (Q_{cal}) a partir das equações da curva-chave polinomial e exponencial para o rio Betume.

4.2 Análise de sensibilidade

Na tabela 4.2 apresenta-se a ordem de importância dos parâmetros que podem influenciar mais na simulação da vazão na bacia hidrográfica do rio Betume. Estes valores foram obtidos em base das funções objetivo NS, PBIAS, R^2 e RSR usando o método SUFI-2. O valor de p (p -Value) determina a significância da sensibilidade onde valores próximos de zero apresentam maior significância (ABBASPOUR et al. 2011)

A análise de sensibilidade determinou que a variação dos parâmetros ALPHA_BF, GWQMN, GW_DELAY e SOL_AWC estão comprometidos com o fluxo subterrâneo e avaliam de forma direta a resposta da vazão subterrânea em função de recarga e nas camadas do solo. Já o parâmetro SOL_AWC, é um indicativo do teor de umidade disponível no solo, este índice é importante porque dependendo do valor se atinge a capacidade de campo, o excesso é drenado subterrânea e superficialmente. Aguiar Netto (1999) explica que em casos de solos permeáveis, como os solos da bacia do rio Betume, este fenômeno ocorre dois ou três dias após de uma chuva ou irrigação.

Tabela 4.2 – Ordem de sensibilidade dos parâmetros para simulação de vazão da bacia hidrográfica do rio Betume.

Parâmetro	Descrição	Ordem Sensibilidade	Processo
ALPHA_BF	Constante de recessão do escoamento de base	0.473	Fluxo subterrâneo
SOL_AWC	Capacidade de água disponível no solo	0.532	Armazenamento, Escoamento Base, Escoamento Superficial
GWQMN	Profundidade limite de água no aquífero raso para o escoamento de base	0.593	Fluxo subterrâneo
GW_DELAY	Tempo de retardo do fluxo subterrâneo	0.613	Fluxo subterrâneo
HRU_SLP	Declividade media (influencia no fluxo lateral e no tempo de concentração)	0.801	Declividade
CN2	Número da curva na condição II de umidade	0.884	Escoamento superficial
CH_N2	Coefficiente de rugosidade de Manning (n) para o canal principal	0.954	Escoamento superficial

Fonte: SWAT-CUP (2012) – Org: R. C. Salazar

Quanto maior o valor de ALPHA_BF, maior será a recarga do aquífero e menor o fluxo de base. Os valores de este parâmetro variam entre 0,1 e 0,3 para locais cujas respostas às recargas são baixas e de 0,9 a 1,0 em locais sensíveis à recarga (ECKHARDT, 2001; NEITSCH et al, 2011; ARNOLD et al., 2012). O valor encontrado de este parâmetro (0,473) indica que a resposta de recarga na bacia não é nem muito lenta nem muito rápida. Ou seja, que a bacia hidrográfica do rio Betume tem uma recarga media, que se vê refletido nas medidas de vazão feitas em campo, quando comparado com a precipitação.

Os outros parâmetros foram HRU_SLP, CN2 e CH_N2 relacionados com o coeficiente de rugosidade de Manning (n), indicam que tem uma grande influência da declividade, a textura do solo e o relevo ondulado da área. Chow (1994) e Lyra (2010) explica que na maior parte dos escoamentos o valor n diminui com o aumento do nível da água, e quando o nível da água é baixa, a irregularidade do fundo do canal está exposta a seu efeito aumentando o valor deste parâmetro. O rio Betume tem uma altura de água que varia de 0,50 a 2,20 m. Assim sendo, se explicam os valores destes parâmetros na bacia.

Strauch et. al (2012) na análise de incertezas simulando a vazão do ribeirão Pípiripau, no Distrito Federal com clima semiúmido; obteve como parâmetros mais influentes o CN2, ALPHA_BF e GWQMN, o autor apresentou discussão relativas a intensidade de precipitação

na zona, o tipo de solo e o fluxo do rio carregado de floresta e vegetação rasteira. O estudo revelou que a incerteza do parâmetro varia significativamente, dependendo do procedimento de otimização usado. Aragão et. al (2013) modelando com SWAT a bacia do rio Japarutuba Mirim, na zona agreste do estado de Sergipe, no análise de sensibilidade destacou os parâmetros ALFA_BH, CN2, GW_DELAY os quais tiveram muita influência sobre os resultados da simulação, e considerou compatível com as condições geológicas e ao clima da região, assim como ao tipo de cobertura do solo.

Pereira (2014) aplicando o modelo SWAT na bacia do córrego Galo em Domingos Martins, estado de Espírito Santo, apresentou também os parâmetros anteriormente citados como os mais influentes na modelagem da bacia. Diferentes pesquisadores como Adriolo et al (2008), Lino et al (2009), Jha (2009), Lelis et al (2012), Durães et al (2012) e Andrade et al (2013) usando o modelo SWAT em bacias hidrográficas brasileiras nas suas análises de sensibilidade os resultados obtidos concordam com os parâmetros mais sensíveis indicados neste estudo.

Alguns dos parâmetros identificados como os mais sensíveis não são facilmente mensuráveis ou estimáveis devido a que não se tem a disposição valores realísticos. Em termos gerais, o modelo SWAT apresentou alto grau de sensibilidade aos parâmetros relacionados à água subterrânea (escoamento de base), ao tipo de solo e ao escoamento superficial no canal principal.

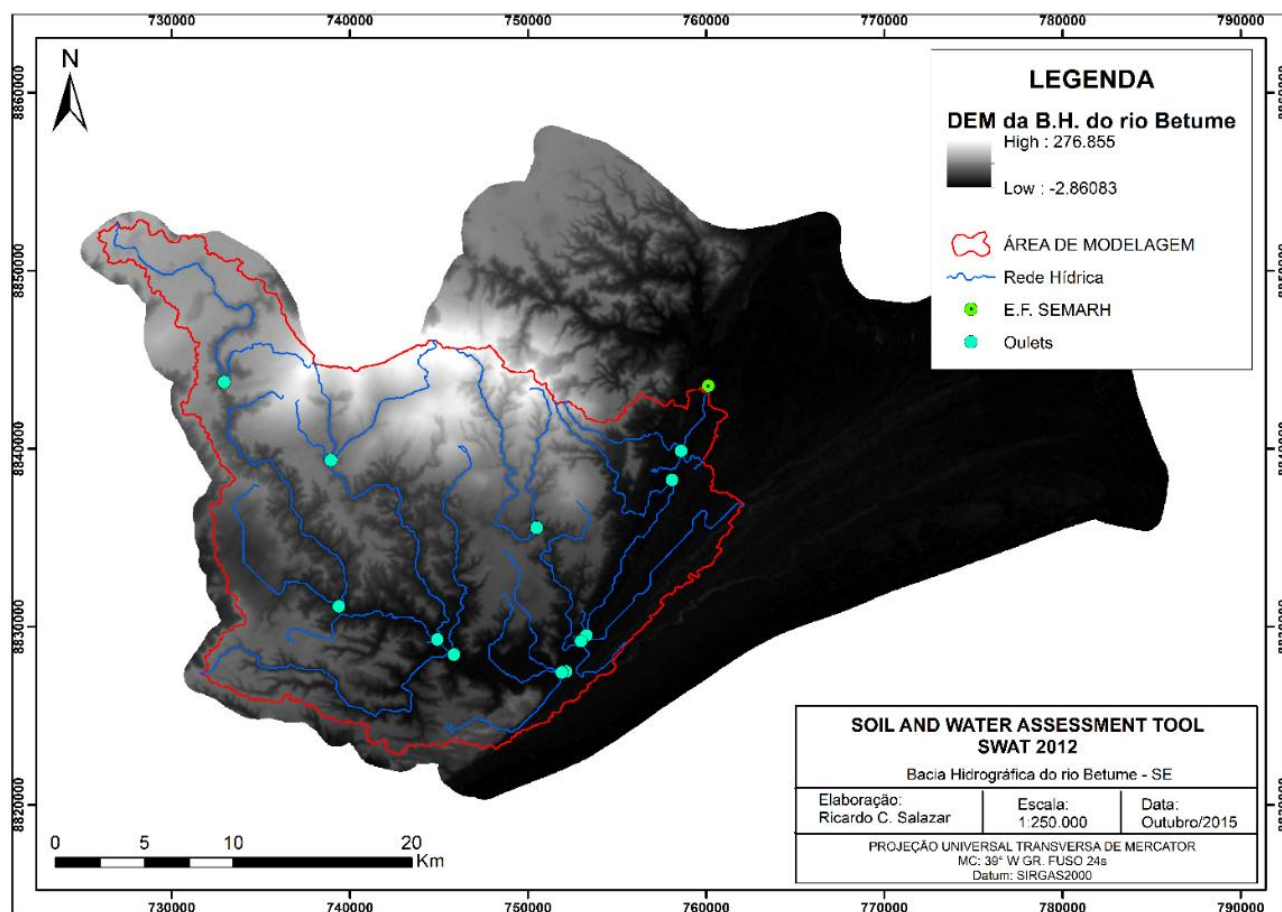
4.3 Modelagem da Bacia Hidrográfica do rio Betume

No processo de modelamento com o SWAT da área de estudo na bacia hidrográfica do rio Betume (Figura 4.4), a partir do DEM, o modelo usando como exutório a E.P.SEMARH, delimitou uma área de 553,63km², dividida em 26 subbacias e com 192 unidades de resposta hidrológica (HRUs) como se apresenta na Figura 4.5 (A; B).

Silva (2013) usando SWAT para modelar a bacia hidrográfica do rio Poxim-Açu, usando um DEM de resolução de 90m, delimitou uma área de 116,11km², obtendo 25 subbacias e 209 HRUs. Oliveira (2014) modelando a bacia hidrográfica no município de Aracruz, estado de Espírito Santo, usou um DEM com resolução espacial de 5 x5 m delimitou uma área de 500 km² na qual o SWAT determinou 22 subbacias e 276 HRUs. Souza e Santos (2013) na

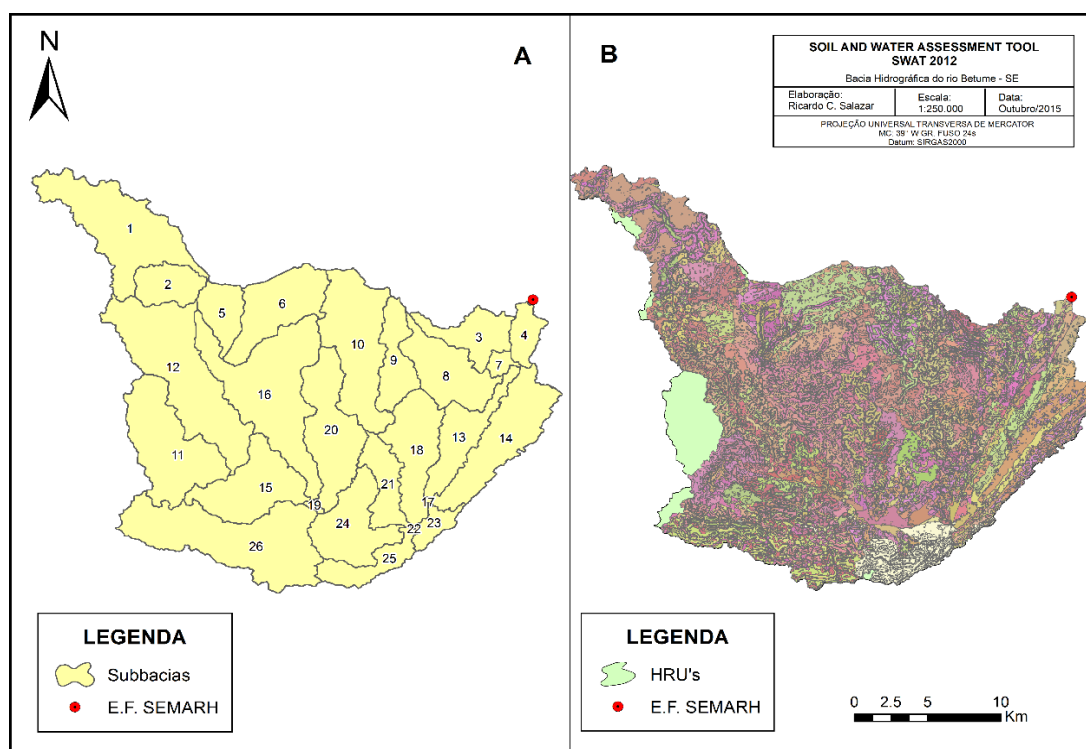
modelagem da bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro com área de 788 km², o modelo delimitou 47 sub bacias e o número de HRUs foi de 436.

Figura 4.4 – Modelo Digital de Elevação da bacia hidrográfica do rio betume usado no SWAT com a delimitação da área de estudo.



Fonte: SWAT – Org: R. C. Salazar

Figura 4.5 – Mapas gerados pelo SWAT: A) Subbacias B) Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs).



Fonte: SWAT – Org: R. C. Salazar

Moro (2005) determinou através do SWAT 38 subbacias na micro bacia hidrográfica do Ribeirão do Marins em uma área de 597,3 km².

Segundo Machado et al (2003) a discretização não esclarece a precisão dos resultados simulados e pode levar a aumentar o tempo de simulação e o tamanho dos arquivos gerados. Uma discretização grosseira pode levar a resultados ruins, enquanto uma muito detalhada requer mais dados de entrada e não garante a otimização dos resultados.

O modelo classificou os solos conforme se mostra na Tabela 4.3 e na Figura (4.6-C) segundo a classificação da EMBRAPA (2006) em: Neossolos ocupando a maior área com 259,68 km² que representa o 50,66% da área total delimitada, Planossolos com 79,5 km² (15,51 %), Argissolos com 107,13 km representando o 20,9% e Espodossolos com 66,3 km² representando o 12,93%.

Para o uso e ocupação do solo o modelo classificou conforme se apresenta na Tabela 4.4 e na Figura 4.6-D, onde a maior área é ocupada pela Agricultura 67.293,77 Ha que representa

36,90 % da área de estudo; seguido pela Pastagem e Floresta Ombrófila Mista com 34,14e 17,07 % respectivamente.

Tabela 4.3 – Classificação dos solos na modelagem com SWAT na bacia hidrográfica do rio Betume.

SIGLA	SOLO	ÁREA (km²)	%
RQd2	Nesossolos Quartzarrênicos	259.68	50.66
SNd	Planossolos	79.5	15.51
PVA10	Argissolos Vermelho Amarelo	107.13	20.90
ES	Espodossolos	66.3	12.93
Total		512.61	100

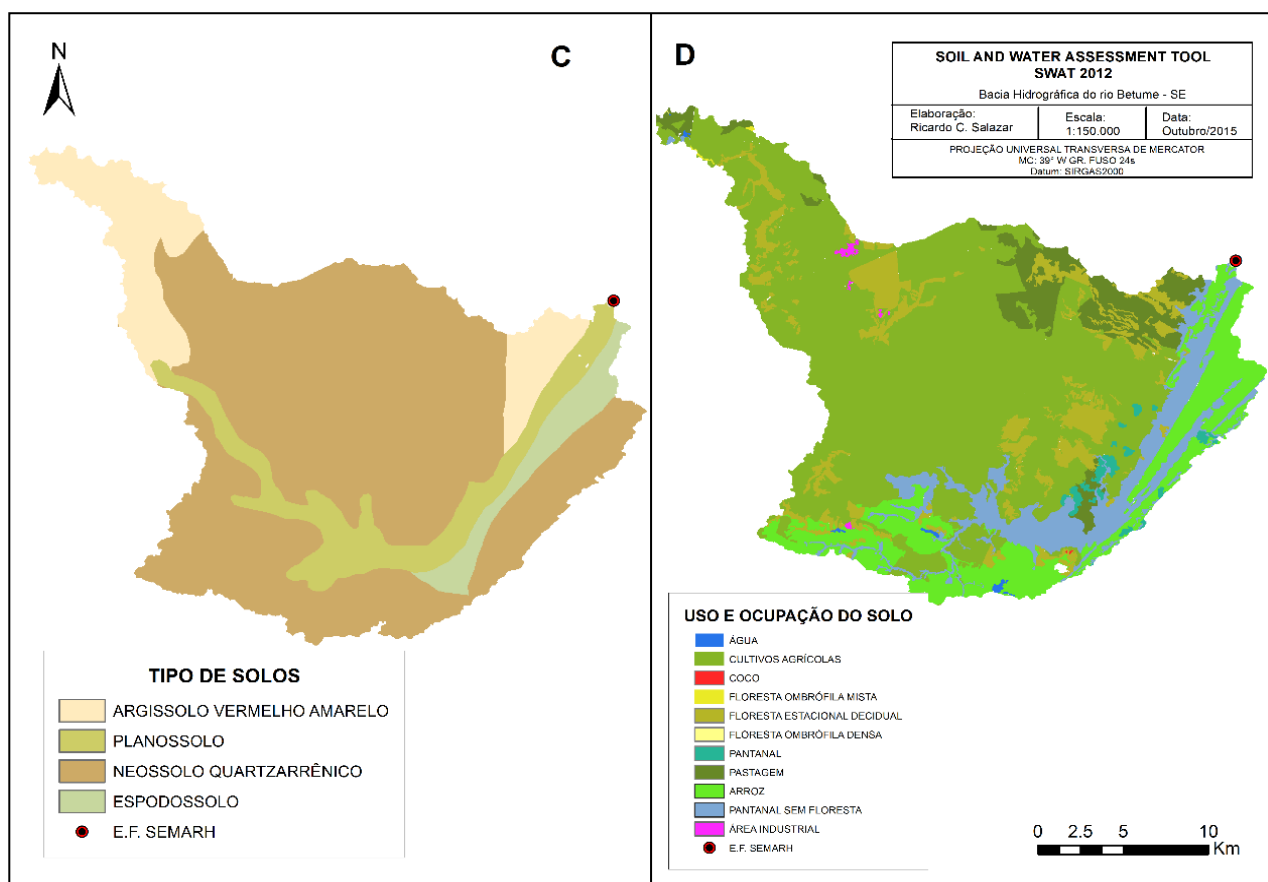
Fonte: SWAT (2012) e EMBRAPA (2006) – Org: R. C. Salazar

Tabela 4.4 – Uso e Ocupação do Solo da modelagem com SWAT na bacia hidrográfica do rio Betume.

ID	USO DO SOLO	AREA (Ha)	%
0	Água	3.043,93	1,67
1	Agricultura	67.293,77	36,90
2	Coco	5.585,34	3,06
3	Floresta ombrófila mista	31.122,46	17,07
4	Floresta estacional decidual	10.334,71	5,67
5	Floresta ombrófila densa	1.333,84	0,73
6	Pantanal	906,88	0,50
7	Pastagem	62.260,64	34,14
8	Arroz	82,65	0,05
10	Pantanal sem floresta	219,21	0,12
12	Área industrial	184,71	0,10
TOTAL		182.368,14	100

Fonte: SWAT (2012) – Org: R. C. Salazar

Figura 4.6 – Mapas gerados pelo SWAT: C) Tipos do Solo D) Uso e Ocupação da terra



Fonte: SWAT – Org: R. C. Salazar

4.4 Calibração e Validação do modelo SWAT

Os resultados da calibração usando o SWAT-CUP, pode se observar na análise visual do hidrograma simulado em relação ao observado, o qual é uma ferramenta importante para avaliar o ajuste básico para uma forma acertada de avaliação do modelo. Nas Figuras (4.7) e (4.8) podem ser analisados os hidrograma observados e simulados, nas fases de calibração e validação do modelo SWAT.

Para a calibração se usaram os dados de janeiro/2013 a março/2014, na qual pode-se observar que para a época seca, janeiro a março dos anos 2013 e 2014 superestimou levemente a vazão; já nos meses de setembro a dezembro de 2013, os valores de recessão foram levemente subestimados. Enquanto para a época chuvosa, nos meses de abril a agosto de 2013 o modelo subestimou levemente os picos de vazão, considerando satisfatório para o modelo.

Figura 4.7 – Hidrograma da vazão mensal referente à calibração no período jan-2013 a mar-2014

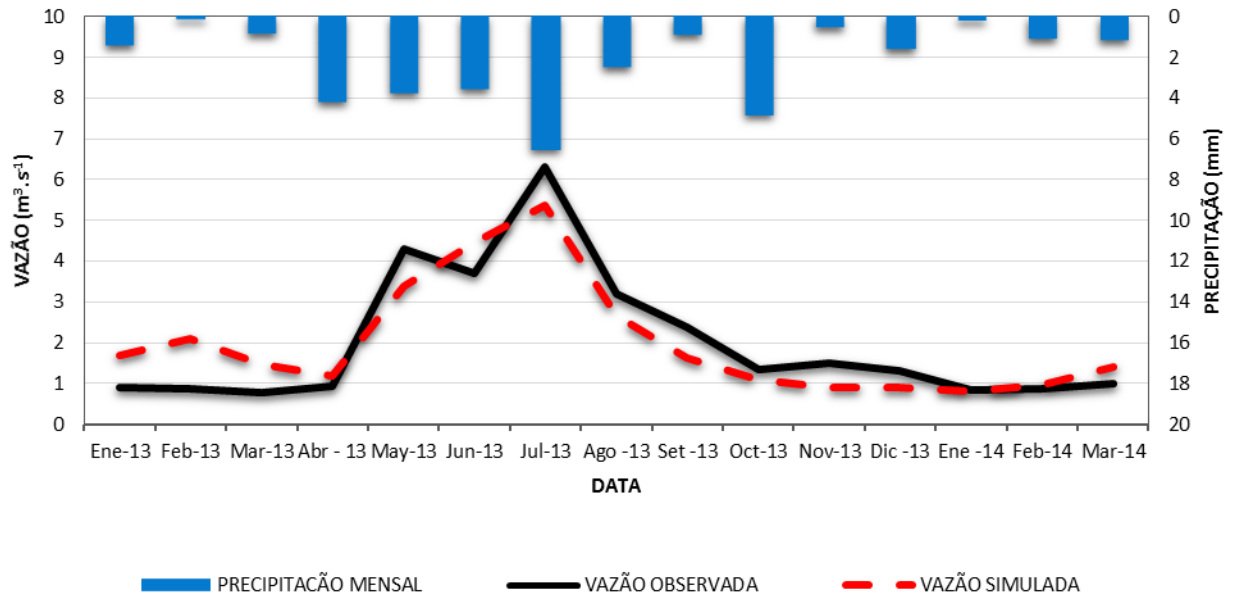
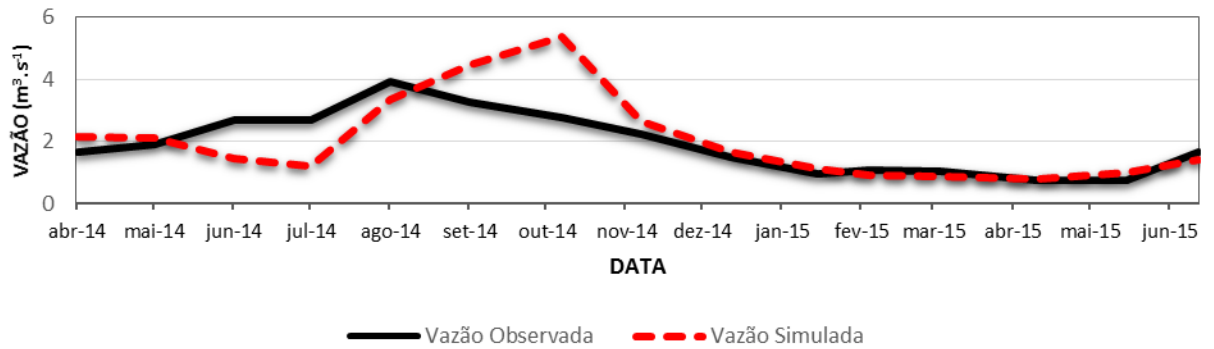


Figura 4.8 – Hidrograma da vazão mensal referente à validação no período abril-2014 a jun-2015



Esta simulação indica que o modelo é mais eficiente na simulação de vazões mínimas (ANDRADE et al. 2013)

De acordo com os valores de desempenho proposta por Moriasi et al (2007) e usados por muitos pesquisadores na análise de modelos hidrológicos; os valores de desempenho na fase de calibração foram considerados muito bom, onde o coeficiente de Nash- Sutcliffe (NS) teve um valor de 0,80, o coeficiente de determinação (R^2) de 0,81; o percentual de tendência (PBIAS) de -1,3 e a raiz quadrada do erro quadrático médio (RSR) de 0,44.

A maioria de trabalhos encontrados na literatura usam o NS, R^2 , PBIAS e RSR para testar a eficiência do SWAT na simulação do comportamento de vazões em bacias hidrográficas. Aragão et al (2013) na calibração de vazões da bacia do rio Japarutuba obteve NS (0,83) e PBIAS (8,5) considerada muito boa. Andrade et al (2013) na fase de calibração no Alto Rio Grande conseguiu NS (0,66) e PBIAS (4,33) enquadrando o modelo na categoria muito bom.

No estado de Sergipe Silva (2013) achou NS (0,74), PBIAS (4,79), R^2 (0,75) e RSR (0,51) o qual foi considerado como muito bom no desempenho do modelo para a bacia hidrográfica do rio Poxim-Açu, na simulação da vazão no passo de tempo mensal. Almeida (2013) no processo de calibração na produção de água da bacia hidrográfica do rio Poxim-Açu obteve NS (0,74), PBIAS (-5,22) e RSR (0,51) considerado o desempenho do modelo SWAT de bom.

Com base nos trabalhos encontrados na literatura sobre a aplicação do modelo SWAT e o desempenho na fase de calibração, pode se observar que os valores de desempenho para a bacia hidrográfica do rio Betume foram considerados satisfatórios na fase de calibração.

Depois de obter resultados satisfatórios no processo de calibração, se fez a validação, a qual é feita com o propósito de confirmar a acurácia do modelo visando a simulação de processos em bacias hidrográficas monitoradas hidrológicamente (ARABI et al. 2007).

O período de validação foi de abril 2014 a junho 2015, o hidrograma mostra graficamente o comportamento das vazões simuladas pelo SWAT em relação as vazões observadas no monitoramento (Figura 4.8) a mesma que foi feita mantendo os valores dos parâmetros da calibração.

Os critérios de avaliação de desempenho do modelo na etapa de validação mostram que os picos de vazão não coincidiram (Figura 4.8), mas houve uma tendência de melhor ajuste nas vazões mínimas. Os valores simulados se ajustaram melhor nas vazões mínimas, já para as vazões de picos maiores, foram superestimados.

Segundo Krausse et al. (2005) a eficiência do modelo aumenta quando o escoamento superficial é muito baixo ou nulo, na qual os erros relacionados com baixos valores de vazões tendem a ser menores que aqueles associados com vazões maiores. Strauch et al (2012) e Aragão et al (2013) encontraram uma situação similar validando o modelo. Nestes casos a simulação foi melhor para vazões mínimas.

Andrade et al. (2013) também observou que essas diferenças no modelo SWAT, tendem a diminuir o NS quando as vazões de pico diferem muito com as vazões mínimas. No processo de validação na modelagem da bacia Alto Rio Grande em Minas Gerais, observou que o modelo tinha melhor ajuste nas vazões mínimas, razão pela qual o valor NS se eleva, com o qual no período de validação os valores foram subestimados.

Aragão et al. (2013) validando o modelo para a bacia do rio Japarutuba, superestimou os valores de pico, explicando esse resultado a um baixo NS (0,41) porém, o desempenho foi considerado satisfatório. Silva (2013) validando o modelo para a bacia do rio Poxim-Açu, percebeu que os picos de vazão dos dados simulados e observados não coincidiram, superestimando a vazão. Explicando que o valor negativo da estatística indica a tendência de superestimação do modelo.

Através dos resultados referentes aos critérios estatísticos R^2 (0,55) e PBIAS (-6,1) pode-se afirmar que o modelo conseguiu reproduzir o padrão do hidrograma; com o qual o modelo é capaz de descrever os processos hidrológicos da bacia hidrográfica do rio Betume.

Ressalta-se que a produção de sedimentos não foi calibrada por falta de dados, o qual não impede que se analise o estudo sobre sua variabilidade espacial, pois de acordo com os desenvolvedores do modelo SWAT, este foi feito também para ser aplicado em bacias não instrumentalizadas. (NEITSCH et al., 2011; UZEIKA et al, 2012), neste caso o estudo é utilizado para realizar inferências sobre as principais áreas produtoras de sedimentos em função ao uso do solo da bacia hidrográfica do rio Betume.

4.5 . Cenários

Após aos processos de calibração e validação, se aplicou o modelo SWAT para simular os cenários descritos na metodologia, os quais foram elaborados para estimar as alterações da produção de água e sedimentos em função das mudanças no uso da terra para o período de 13 anos, desde 2002 a 2014.

O resumo dos resultados de simulações nos três cenários descritos na metodologia está apresentado na Tabela 4.5. A coluna de título “Uso Atual” trata do quadro real da bacia hidrográfica do rio Betume, que conta com a existência de várias coberturas do solo: plantios de coco, frutais, pastagem, grama, florestas variadas, cana de açúcar, arroz, e outros plantios de subsistência.

Tabela 4.5- Valores das médias anuais dos resultados da simulação dos três cenários entre o período de 2002 a 2014

Média Anual	Cenário 1 Uso Atual	Cenário 2 Reflorestação	Cenário 3 Agricultura
Escoamento superficial (mm)	211.66	219.46	183.18
Produção água (mm)	9.78	7.25	16.63
Produção sedimentos (ton.ha ⁻¹)	10.37	8.73	12.83

Fonte: Autor

O cenário 2, de reflorestamento com floresta mista (floresta ombrófila e mata ciliar), apresenta um leve acréscimo no escoamento superficial, este fato é interessante porque o comportamento hidrológico da bacia é principalmente no escoamento de base, como se demonstrou no análise de sensibilidade. Quando a cobertura do solo é floresta se produz maior quantidade de matéria orgânica e consequentemente os solos ficam melhor estruturados, aumentando a infiltração de água no solo (Uzeika, 2009; Lelis, 2012; Silva, 2013)

O reflorestamento apresenta a situação da maior proteção contra a erosão do solo, Carvalho Netto (2011) encontrou uma redução de sedimentos e maior conservação do solo quando simulou reflorestamento com algaroba. Enquanto o cultivo do milho apresentou uma

elevada degradação do solo. Perazzoli (2013) e Aragão obtiveram resultados similares onde o solo se conserva melhor com Mata Nativa.

O cenário 3 de Agricultura apresenta um decréscimo no escoamento superficial de -13,45% em relação a cenário do uso atual. Neste caso a produção de água e sedimento aumentou em 70,04 e 23,72% respectivamente, este último cenário causou um maior impacto na bacia aumentando a erosão hídrica e a carga de sedimento. Perazzoli (2013), em seu estudo, encontrou no cenário Agricultura quase o triplo da produção de sedimentos em comparação ao cenário Mata Nativa.

Na Figura (4.9) são apresentados os mapas de produção de água para as subbacias, referente ao período de 2002 a 2014 nos três cenários propostos: Cenário 1- Uso atual, Cenário 2 -Reflorestação e Cenário 3 - Agricultura. Os valores médios de produção de água no cenário 1 variaram de 2,17 a 25,26 mm.ano⁻¹. As subbacias 5 e 11 apresentaram as menores produções de água entre 2,17 a 2,77 mm.ano⁻¹. Observa-se que a subbacia 5 apresenta uma área industrial de 47,7 ha, o uso do solo é floresta e agricultura; o que justifica os baixos valores simulados. As subbacias 1, 6, 9, 10, e 26 tem valores médios de produção de água entre 7,87 a 11,65 mm.ano⁻¹. Em estas subbacias encontram-se localizadas a maioria das nascentes do rio Betume e o solo predominante é o Neossolos com cobertura vegetal de cultivos agrícolas.

Por outro lado, as subbacias 3 e 8 são as principais produtoras de água 25,26 e 16,80 mm.ha⁻¹.ano⁻¹ respectivamente. Essas subbacias apresentam em comum solos Argissolos Vermelho Amarelo e Neossolos Quartzarrênicos, que apresentam velocidade de infiltração muito alta, superiores a 3 cm.h⁻¹ (Silva, 2013), e mais de 60% de suas áreas é ocupada por pastagem e floresta nativa. Silva (2013) ao avaliar a distribuição da produção de água na bacia hidrográfica do rio Poxim-Açu, também encontrou como principais subbacias produtoras de água aquelas que possuíam áreas ocupadas por pastagem como classe predominante do solo tipo Argissolos.

Para o cenário 2, a produção de água sofreu um decréscimo de -26%. Vários fatores contribuem para este resultado, dentre eles pode-se citar o menor valor da CN de 55 e o aumento da evapotranspiração que segundo Lino (2009), contribui para o menor escoamento superficial. Neste cenário a produção média anual de água considerou valores compreendidos entre 0,69 e 15,00 mm.ano⁻¹. As subbacias 1, 2, 5 e 11 apresentaram os valores mais baixos de

produção, entre 0,69 a 2,83 mm.ano⁻¹, em quanto a subbacia 3 continuo sendo a maior produtora de água (15,00 mm.ano⁻¹). Neste cenário as subbacias 13, 15, 19, 20, 21, 23, e 24 com solos Planossolos e Espodossolos com áreas embrejadas, apresentaram uma produção de água maior a 8,24 mm.ano⁻¹.

Lelis (2011) encontrou uma redução na produção de escoamento superficial e sedimentos quando substituiu 15% da pastagem pelo uso floresta, enquanto substituindo da área de floresta por pastagem em 25% houve um aumento na produção de sedimento e um decréscimo na produção de escoamento superficial. Carvalho Netto (2011) simulando cenários para a bacia hidrográfica do riacho dos namorados no cariri paraibano usando vegetação nativa frente algaroba e um valor CN de 77 em ambos casos, os resultados evidenciaram uma perda de solo de quase o dobro, já na produção do escoamento superficial foi maior no cenário de vegetação nativa.

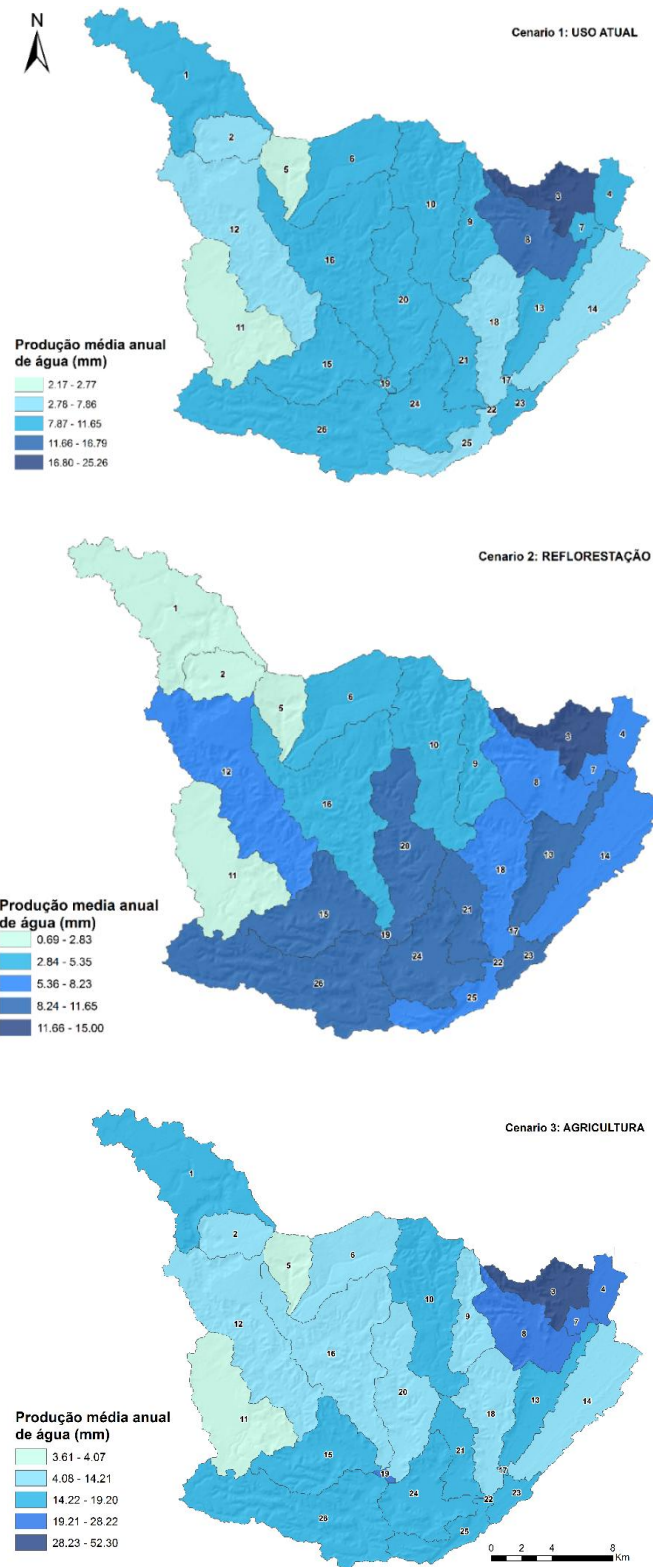
No cenário 3, a produção média anual de água se acrescentou 70% com relação ao cenário 1. As subbacias 5 e 11 foram novamente as que apresentaram os valores mais baixos de produção (< 4,07 mm.ano⁻¹). E a subbacia 3 se mantendo com a maior produção de água (52,30 mm.ano⁻¹).

A subbacia 26 onde se localiza a principal nascente do rio Betume, apresentou uma produção média anual de água entre 14,22 a 19,20 mm.ano⁻¹.

A produção de água nas subbacias tende aumentar na direção nascente-foz nos três cenários simulados (Figura 4.9), observa-se que as subbacias que produz mais agua estão ao logo do rio Betume. A legislação brasileira adota uma largura mínima de acordo com a largura do curso de agua (Machado, Vettorazzi e Xavier, 2003). Percebe-se a importância de ações de conservação e preservação das florestas as margens do corpo hídrico a exemplo do Projeto Aguas de São Francisco para garantir a quantidade e qualidade dos recursos hídricos na bacia hidrográfica.

O cuidado e manutenção de florestas promove modificações nas propriedades do solo como o aumento da condutividade hidráulica do solo, redução da densidade, aumento da capacidade de armazenamento de água, os quais contribuem para o aumento da disponibilidade hídrica média ao longo do tempo. (BLAINSKI, ARAUJO E GOMES, 2011).

Figura 4.9 - Produção de água dos cenários 1, 2 e 3 na bacia hidrográfica do rio Betume



Através dos cenários simulados pode-se verificar que as alterações no uso e ocupação da terra, promovem mudanças na produção de água, uma vez que as propriedades físico-hídricas dos solos são modificadas, como densidade, porosidade, teor de matéria orgânica, dentre outras. (SILVA, 2013).

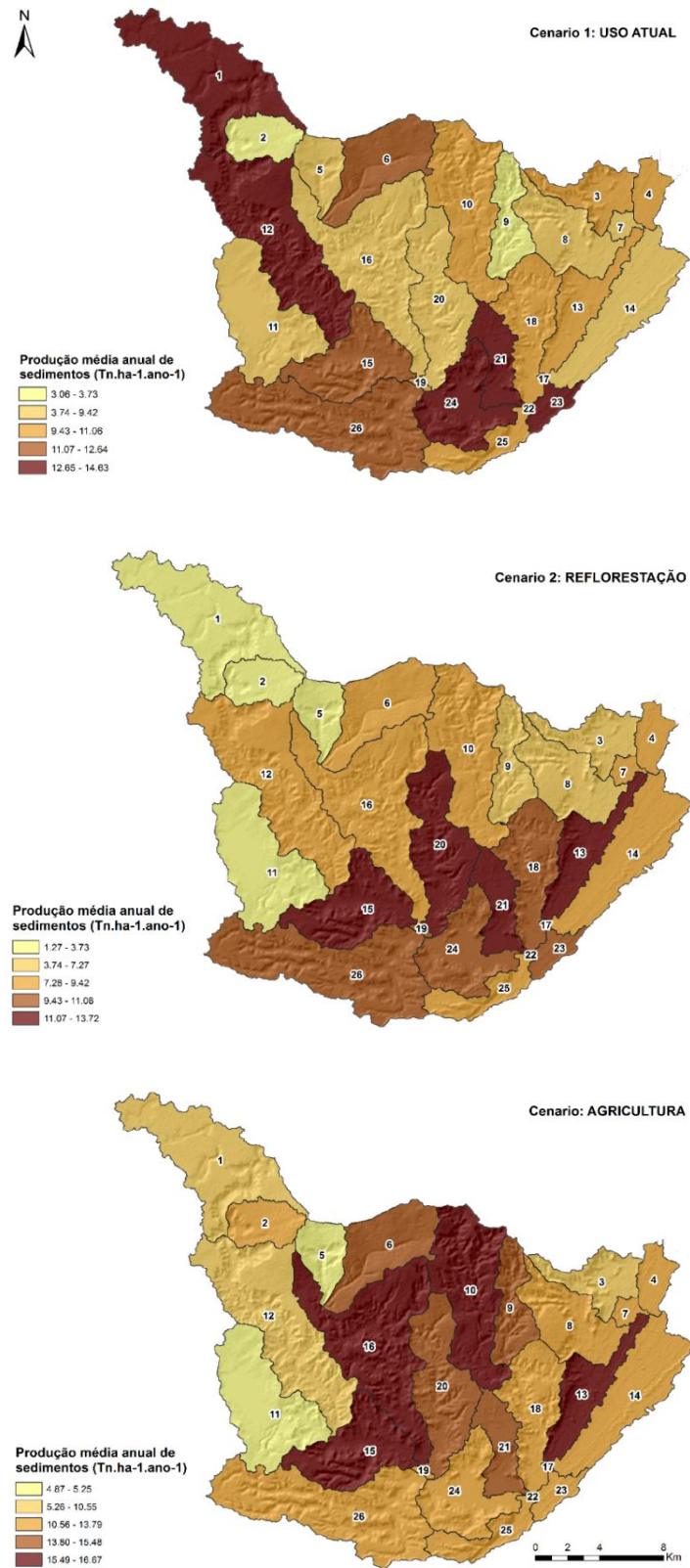
A produção de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Betume apresentou uma maior variação com a mudança do uso da terra a partir dos cenários simulados, em comparação com a produção de água. Na Figura 4.10 é apresentada a produção de sedimentos para cada cenário simulado nas diferentes subbacias.

No cenário 1 pode-se observar que a maior taxa de produção de sedimentos se concentra nas subbacias 1, 12, 21, 23 e 24 com valores de 12,65 a 14,63 $\text{tn.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$. Estas subbacias se caracterizam por possuírem grandes áreas de solos Argissolos e Neossolos e em sua maioria são usadas para cultivos agrícolas e pastagem. As subbacias 2 e 9 foram as que apresentaram menores valores de produção de sedimentos ($< 3,73 \text{ tn.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$) observasse que nestas subbacias apresentam quase um 15% de floresta, o solo predominante é o Neossolos Quartzarenicos, que são solos com alta capacidade de infiltração, reduzindo o carreamento de sedimentos. (SILVA, 2013).

O cenário 2 apresentou menor produção de sedimentos em relação aos cenários 1 (uso atual) e 3 (agricultura) em -15,81 % ($1,64 \text{ tn.ha}^{-1}$) e -46,96 % ($4,1 \text{ tn.ha}^{-1}$) respectivamente. Corroborando estes resultados com os estudos realizados por Carvalho Netto (2010), Silva (2013), e Perazzoli (2013) onde foi constatado que a menor perda de solo foi na simulação de cenários alternativos, quando o uso da terra foi substituído por florestas. No mesmo modo estes autores ressaltaram que as maiores perdas do solo estão relacionadas à agricultura.

A diferença entre o cenário 2 com os cenários 1 e 3, é que um solo recoberto com florestas atua como barreira aos sedimentos, protegendo ao solo da erosão das chuvas e o vento. Dessa forma as florestas funcionam como um filtro de produção de sedimentos e outros sólidos em suspensão do escoamento superficial, diminuindo assim, os processos erosivos e consequentemente a produção de sedimentos. (MACHADO; VETTORAZZI; XAVIER, 2003; PINTO, 2011)

Figura 4.10 – Produção de sedimentos nos cenários 1, 2 e 3 na bacia hidrográfica do rio Betume



As subbacias 1, 2, 5 e 11, no cenário 2, foram as que apresentaram os mais baixos valores na produção de sedimentos com valores de 1,27 a 3,37 $\text{tn.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$. Estes resultados são explicados em decorrência da baixa produção de água para o mesmo cenário (Fig. 4.9). As subbacias 13, 15, 20 e 21 apresentaram os mais altos valores de produção de sedimentos entre 11,07 e 13,72 $\text{tn.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$. Contudo é observado que a produção de sedimentos nestas subbacias aumenta de forma alarmante. Uma vez que este cenário a taxa de produção é mais baixo. Diante desses resultados é necessário a utilização de medidas que junto ao Código Florestal venham ajudar a solucionar a problemática hídrica no semiárido Sergipano.

O cenário 3 apresenta a taxa de produção de sedimentos mais alta, quando comparadas com o cenário 1 mostraram um acréscimo de 23,7% e com o cenário 2 de 46,9% na produção; apresentando valores de 4,87 a 16,67 $\text{tn.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$. Neste cenário as subbacias 5 e 11 foram as que apresentaram menor taxa de produção de sedimentos. As maiores perdas de solo foram observadas nas subbacias 10, 13, 15 e 16 com valores de 13,80 a 15,48 $\text{tn.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$. Estas subbacias tem como solos predominantes os Neossolos Quartzarrênicos e Planossolos.

Perazzoli (2013) comenta que as atividades agrícolas alteram a proteção dos solos, deixando-o susceptível a ação do impacto da chuva e ao escoamento superficial, bem como pode promover a desestruturação da camada superficial do solo, justificando assim os resultados dos valores mais elevados neste cenário.

No cenário 3 a maior produção de sedimentos se concentrou na parte alta da bacia, onde se encontram as nascentes do rio Betume; ao contrário de Machado e Vettorazzi (2003) que verificaram que a maior produção de sedimentos ocorre na baixa bacia, enquanto que na alta bacia ocorre a menor produção de sedimentos. Arroio Junior, et al (2013) encontrou em seu estudo que as áreas de maior produção de sedimentos ocorreram nas proximidades das nascentes do Ribeirão do Lobo e do rio Itaqueri, aliadas ao elevado potencial de geração de escoamento superficial e aos solos tipo Argissolos Vermelho Amarelo e Neossolos Quartzarenicos, gerando maior perda de solo, e, conseqüentemente, maior produção de sedimentos.

A perda de solos que se ocasiona nas bacias hidrográficas devido à erosão e modificações na estrutura dos solos principalmente por ações antrópicas, é de grande preocupação, pois além da perda de terras agricultáveis, os sedimentos nos corpos d'água,

prejudicam a qualidade da água através dos patógenos, agroquímicos e outros poluentes que podem ser transportados em solução ou ligados aos sedimentos (CHU, 2004).

De forma geral, nos cenários apresentados, os resultados mostram que mais de 69% da produção de água é escoamento de base, o que indica que o regime do rio Betume depende principalmente da água subterrânea e a maior produção de sedimentos é originada de atividades agrícolas. Com estas visualizações dos resultados é possível identificar de forma rápida nos três cenários as subbacias mais suscetíveis à baixa produção de água como a elevada produção de sedimentos. Por tanto, diante dos resultados analisados é preciso procurar as medidas corretivas necessárias para reduzir os impactos provenientes do desmatamento, e o desenvolvimento desmensurado de atividades agrícolas.

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no presente estudo levam às seguintes conclusões:

A dinâmica hidrossedimentológica da bacia hidrográfica do rio Betume pode ser estudada a partir do monitoramento quantitativo, simulando a produção de água e sedimentos mediante a ferramenta SWAT para diferentes cenários hipotéticos.

A dinâmica hidrossedimentológica da bacia hidrográfica do rio Betume se baseia principalmente no fluxo de escoamento de base, onde os parâmetros mais sensíveis determinados a partir da modelagem com SWAT foram: Constante de recessão de escoamento de base (ALPHA_BF), Capacidade disponível no solo (SOL_AWC), Profundidade limite de água no aquífero raso para escoamento de base (GWQMN), tempo de retardo do fluxo subterrâneo (GW_DELAY), declividade média (HRU_SLP), número da curva na condição II de umidade (CN2) e coeficiente de rugosidade de Manning (CH_N2).

A simulação da vazão do rio Betume com o modelo SWAT apresentou ajuste satisfatório, principalmente no que diz respeito a vazões mínimas, com NS de 0,80; PBIAS de -1,3; R^2 de 0,81 e RSR de 0,44. Mostrando que o modelo SWAT pode representar de forma satisfatória o comportamento hidrológico da bacia hidrográfica do rio Betume.

Se gerou a curva-chave do rio Betume por meio das medições de vazão no rio. O monitoramento da vazão a través da curva-chave é um instrumento importante para o planejamento de uma bacia hidrográfica permitindo quantificar o volume de água do rio Betume em função do tempo e do espaço, de forma simples e rápida.

A simulação de cenários alternativos permitiu uma avaliação objetiva dos processos hidrossedimentológicos, constatando-se que as alterações no uso e ocupação do solo influenciam no regime de produção de água e sedimentos na bacia hidrográfica do rio Betume e os mapas gerados da saída dos resultados do modelo SWAT, permitem uma visualização global da distribuição espacial, tornando-se possível identificar rapidamente áreas com grandes riscos de erosão hídrica e ambientalmente mais frágeis, que servem para o planejamento da bacia na definição de ações que possam garantir a quantidade e qualidade da água na região de estudo.

O cenário de ocupação da bacia hidrográfica por floresta apresentou a menor produção média anual de água e sedimentos, demonstrando ser um eficiente elemento para redução da carga de sedimentos e também garante a maior disponibilidade hídrica para os múltiplos usos da água na região. Estes aspectos evidenciam a importância de programas de restauração e reflorestamento de áreas degradadas como o Projeto Águas de São Francisco.

O cenário agricultura apresentou a maior taxa média anual de produção de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Betume, donde as subbacias que possuem predominância de Argissolos Vermelho Amarelo e Neossolos Quartzarênicos associados com pastagem são as principais produtoras de sedimentos. A obtenção deste cenário é importante para o planejamento da bacia em estudo visto que permite conciliar a capacidade de uso do solo conforme as fragilidades detectadas. Com o qual se faz necessário estabelecer práticas de manejo adequadas para evitar o carreamento de sedimentos para os corpos d'água na bacia hidrográfica.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ABBASPOUR, K.C. SWAT-CUP2009: *SWAT Calibration and Uncertainty Programs – a user manual*. Department of Systems Analysis, **Integrated Assessment and Modelling** (SIAM), Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf, Switzerland, 95 p.2011.

ABBASPOUR, K. C. **SWAT-CUP**: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual. 2012. 103 p. Disponível em: <[http://www.neprashtechology.ca/ Downloads.aspx](http://www.neprashtechology.ca/Downloads.aspx)>. Acesso em: 06 de jun. 2015.

ADRIOLO M. C.; SANTOS. I. DOS; GIBERTONI, R. C.; CAMARGO, A. S. G. **Calibração do modelo SWAT para a produção e transporte de sedimentos**. VI Simpósio Brasileiro sobre Pequenas e Médias Centrais Hidroelétricas. Belo Horizonte, MG. T24-A03, 18p. 2008.

AGUAS DO SÃO FRANCISCO. Disponível em: <http://aguasdosaofrancisco.org.br/> Acesso em 05 abril 2014.

AGUIAR NETTO, A. O.; NACIF, P. G. S.; REZENDE, J. O. Avaliação do conceito de capacidade de campo para um latossolo amarelo coeso do estado da Bahia. **Revista Brasileira Ciência e Solo**, Viçosa, v. 23, n. 3, p. 661-667. 1999.

AGUIAR NETTO, A. O; LUCAS, A. AN. T. SANTOS, A. G; ALMEIDA, C. A. Água e ambiente no Baixo São Francisco Sergipano. In: AGUIAR NETTO, A. O; LUCAS, A. AN. T. **Águas do São Francisco**. São Cristóvão: Editora UFS, 312p. 2011.

AGUIAR NETTO, A. O. et al. Calibração do modelo hidrodinâmico MIKE 11 para sub-bacia hidrográfica do rio Piautinga, Sergipe, Brasil. **Ambi-Agua, Taubaté**, v.5, n3, p.195-207, 2010.

AGUIAR NETTO, A. O.; GOMES, C. C. S.; LINS, C. C. V.; BARROS, C. B.; CAMPECHE, L. F. de S. M.; BLANCO, F. F. Características Químicas e salino-sodicidade dos solos do perímetro irrigado Califórnia, SE, Brasil. **Ciência Rural, Santa Maria-RS**, v. 37, n. 6, p. 1640-1645. Nov-dez, 2007a.

AGUIAR NETTO, A. O.; MACHADO, R.; VARGAS, M. A. M. Sustentabilidade do perímetro irrigado Jabiberi. **RA EGA (UFPR)**, v. 12, p. 153-159, 2006a.

AGUIAR NETTO, A. O.; SANTANA, N. R. F. Contexto socioambiental das águas do rio São Francisco. 1. Ed. São Cristóvão: Editora UFS, 341p. 2015.

ALMEIDA, C. A. P. de. **Estudos preditivos da produção de água na bacia hidrográfica do Rio Poxim-Açu em Sergipe**. Dissertação (Mestrado) – Programa em Desenvolvimento e Meio Ambiente – Universidade Federal de Sergipe/SE, 100 p. 2013.

ANDRADE, M. A.; MELLO, C. R. de; BESKOW, S. Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 1, p. 69-76, 2013

ARABI, M.; GOVINDARAJU, R. S.; HANTUSH, M. M. A probabilistic approach for analysis of uncertainty in the evaluation of watershed management practices. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 333, p. 459-471, 2007.

ARAGAO, R. de et al. Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo SWAT e simulação dos processos hidrossedimentológicos em uma bacia no agreste nordestino. **Revista Brasileira Ciência e Solo**, Viçosa, v.37, n.4, p.1091-1102, agosto, 2013.

ARNOLD, J. G., R. SRINIVASAN, R. S. MUTTIAH, AND J. R. WILLIAMS. Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model Development. **Journal of the American Water Resources Association** 34: 73-89. 1998.

ARNOLD, J. G.; MORIASI, D. N.; GASSMAN, P. W.; ABBASPOUR, K. C.; WHITE, M. J.; SRINIVASAN, R.; SANTHI, C.; HARMEL, R. D.; VAN GRIENSVEN, A.; VAN LIEW, M. W.; KANNAN, N.; JHA, M. K.) SWAT: Model Use, Calibration, and Validation. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, Transactions of the ASABE, v. 55(4), p. 1491-1508. 2012.

ARNOLD, J. G.; FOHRER, N. Swat 2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. **Hydrological Processes**, v. 19, p. 563-572, 2005.

ARNOLD, J. G; WINCHELL, M; SRINIVASAN, R. AND DI LUZIO AND, **ArcSWAT Interface for SWAT2009 User's Guide**, Texas A&M University, August 2010.

ARROIO JUNIOR, P. P.; KUWAJIMA, J. I.; MAUAD, F. F. Avaliação da produção de sedimentos em uma bacia de pequeno porte por meio do simulador SWAT. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. 20. 2013. BENTO GONÇALVES / RS. **Anais: Bento Gonçalves / RS: ABRH**, 2013.

BAHIA. SEPLANTEC-SECRETARIA DO PLANEJAMENTO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA: **Recursos Hídricos no Estado da Bahia – Ênfase no semi-árido**. Salvador, 105p. 1995b.

BALDISSERA, G. C. **Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool), para a bacia hidrográfica do Rio Cuiabá/MT**. 2005. 144 f. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente) - Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, MT, 2005.

BALTOKOSKI, V.; TAVARES, M. H. F.; MACHADO, E. R.; OLIVEIRA, M. P. Calibração de modelo para a simulação de vazão e de fósforo total nas sub- bacias dos rios Conrado e Pinheiro – Pato Branco (PR). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 1, 2010.

BLAINSKI, E.; GARBOSSA, L. H. P.; MALUTTA, S. Aplicação do modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para a simulação da perda de solo e da disponibilidade hídrica em uma bacia hidrográfica não instrumentada. In: SIMÓCIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 10., 2010, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: ABRH, 2010.

BLAINSKI, E.; ARAUJO, I.; GOMES, P. Modelagem e simulação do uso do solo e as alterações no ambiente. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIENCIA DO SOLO, 23., 2011, Uberlândia. **Anais...**, Uberlândia: SBCS, 2011.

BRASIL. Lei Nº 6938/1981 - "Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências" - Data da legislação: 31/08/1981 -. Diário Oficial da União, Brasília, 02 de set. 1981, Seção 1.

_____. Lei Nº 9433/1997 - "Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989" Data da legislação: 08/01/1997 - Diário Oficial da União, Brasília, 09 de jan. 1997, Seção 1. p. 470.

_____. ANA - Agência Nacional das Águas. **GEO Brasil: Recursos Hídricos: Resumo Executivo**. Brasília: MMA: ANA, 2007.

_____. ANA - Agência Nacional das Águas. **GUIA NACIONAL DE COLETA E PRESERVAÇÃO DE AMOSTRAS: Água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos**. Brasília: MMA: ANA, 2011.

_____. ANA - Agência Nacional das Águas. **A gestão dos recursos hídricos no Estado de Sergipe. Série: Sistema Nacional de Informações Sobre Recursos Hídricos**, CD nº 1, versão preliminar, 2011.

_____. CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **O problema da escassez de água no mundo**. Disponível em <http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/%C3%81guas-Superficiais/37-O-Problema-da-Escassez-de-%C3%81gua--no-Mundo>. Acessado em 01 de abril 2015.

_____. MMA – Ministerio do Meio Ambiente. **Programa de revitalização da bacia hidrográfica do rio São Francisco**. Disponível em: http://www.mma.gov.br/estruturas/PRSF/_arquivos/diag.pdf. Acessado em 04 de novembro 2014

_____. CODEVASF – Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e Parnaíba. Disponível em: http://www.codevasf.gov.br/principal/publicacoes/publicacoesatuais/pdf/baixo_sao_francisco.pdf/view. Acessado em 10 de junho 2014.

_____. SEMARH - Secretaria Do Estado Do Meio Ambiente E Recursos Hídricos. Disponível em www.semarh.se.gov.br/srh. Acessado em 06 de janeiro 2015.

BERTOLDO, F.; RIGHES, A. A. Curva-chave do Arroio da Bacia-Escola Urbana, em Santa Maria, RS. **Disc. Scientia**, v. 5, n. 1, p. 11-29, 2004.

BRITTO, F. B. et al. Avaliação do risco de contaminação hídrica por agrotóxicos no perímetro irrigado Betume no Baixo Rio São Francisco. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 9, n. 3, p. 158-170, 2015.

BOSKIDIS, I. et al. Hydrologic and water quality modeling of lower Nestos river basin. **Water Resource Management**, v. 26, p. 3023-3051, 2012.

CARVALHO NETO, J. G; SRINIVASAN, V. S.; RUFINO, I. A. A. Aplicação do modelo SWAT para estudo de cenários hipotéticos na bacia hidrográfica do riacho dos namorados no Cariri Paraibano. **Revista Geográfica Acadêmica**, Samambaia, v. 5, n.1, p. 48-58, 2011.

CARVALHO, T. M. Técnicas de medição de vazão por meios convencionais e não convencionais. **Revista Brasileira de Geografia Física**. Vol. 01 n. 01 mai/ago. p73-85. 2008.

CHOW, V. T. **Hidráulica de canales abiertos**. Santafe de Bogotá: Mc Graw-Hill Interamericana S.A., 667p. 1994.

CHU, T. W. Evaluation of the SWAT model's sediment and nutrient components in the piedmont physiographic region of Maryland, **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 47, n. 5, p. 1523-1538, 2004.

CIBIN R.; SUDHEER, K.P. & CHAUBEY, I. **Sensitivity and identifiability of stream flow generation parameters of the SWAT model Hydrology Process**. Published online in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com) DOI: 10.1002/hyp.7568. p.1133-1148. 2010.

COLEMAN, D. J.; SCATENA, F. N. **Identification and evaluation of sediments sources. In: HADLEY, R.F. (Ed). Drainage basin sediment delivery**. Wallingford: IAHS (International Association of Hydrological Sciences. Publication n. 159) p. 3 – 18. 1986.

COLLISCHONN, W. & TUCCI, C. E. M. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. v6, n1 jan/mar. p.95-118. 2001.

CÔRREA, I.C.S. **Metodologia para o cálculo de vazão de uma seção transversal a um canal fluvial**. Ponte Alegre: UFRGS, 2008.

COSTA, L. F, VIEIRA, I; Maria PINOTTI, S. M. **Projeto Cadastro da Infraestrutura Hídrica do Nordeste**. Aracaju: CPRM, 2002.

CHRISTOFOLETTI. **A Modelagem de Sistemas Ambientais**. Ed. Edgard Blucher Ltda. 1ª Ed. 1999.

CRUZ, M. A. S. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento: Regionalização de precipitações médias e prováveis mensais e anuais no estado de Sergipe**. Aracaju, SE: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 26 p. 2009.

DANISH HYDRAULIC INSTITUTE. **MIKE 11 - a modeling system for rivers and channels**. Horsholm: Danish Hydraulic Institute, 454p, 2005.

DURÃES,M.F; DE MELLO, C.R; NAGHETTINI, M. Applicability of the SWAT model for hydrologic simulation in paraopeba river basin, MG. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 4, p. 481-488, out./dez. 2011.

ECKHARDT, K.; ARNOLD, J. G. Automatic calibration of a distributed catchment model. **Journal of Hydrology**, v. 251, p. 103-109, 2001.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos e análise de solo.** Rio de Janeiro. 212p. (EMBRAPA-CNPS. Documento, 1). 1997.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 306p, 2006.

ENOMOTO, C. F. **Método para elaboração de mapas de inundação estudo de caso na bacia do rio Palmital, Paraná.** Dissertação (Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Setor de Tecnologia) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 132p, 2004.

GALVÁN, L. et al. Application of the SWAT model to an AMD – affected river (Meca River, SW Spain). Estimation of transported pollutant load. **Journal of Hydrology**, v 377, p. 445 – 454, 2009.

GASSMAN, P. W.; REYES, M.; GREEN, CH. E ARNOLD, J. G. **The Soil and Water Assessment Tool: Historical development applications, and future directions.** Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers (Invited Papers Series) 50(4): 1211-1250. 2007.

GEO-BRASIL2002. Disponível em:

http://www.uff.br/cienciaambiental/biblioteca/geobrasil/rec_hidricos.pdf. Acessado em 06 de janeiro 2015.

GLOBAL WATER. **FP111 – FP112 – FP113 Global Flow Probe, user's manual.** Global Water Instrumentation, Inc. 18p. 2009.

GOMES, J. & SANTOS, I. **Análise comparativa de campanhas de medição de descarga líquida pelos métodos convencional e acústico.** In: XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 32-36p. 2003.

GREEN, C. H.; van GRIENSVEN, A. Autocalibration in hydrologic modeling: Using SWAT2005 in small-scale watersheds. **Environmental Modelling & Software**, v. 23, p. 422-434, 2008.

HERRINGTON, L., PELLEGRINI, G. **An advanced shape of country classifier: extraction of surface features from DEMs.** In Proceedings of the 4th International Conference on GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4), Problems, Prospects and Research Needs, 2–8 September 2000, Banff, Alta. Disponível em: <http://www.colorado.edu/research/cires/banff/pubpapers/205/>. Acesso em abril 2015.

INFOESCOLA. Disponível em: <http://www.infoescola.com/geografia/zona-da-mata/>. Acesso em 06 de janeiro 2015.

JAYAKRISHNAN, R; SRINIVASAN, R; SANTHI, C e ARNOLD, J. G. Advances in the application of the SWAT model water resources management. **Hydrological Processes**. 19, 749-762. DOI: 10.1002/hyp.5624. 2005.

JEONG, J.; KANNAN, N.; ARNOLD, J.; GLICK, R.; GOSSELINK, L. & SRINIVASAN, R. **Development and integration of sub-hourly rainfall–runoff modeling capability within a watershed model**. Water Res Manage. DOI 10.1007/s11269-010-9670-4. 2010.

JHA, M. **Hydrologic Simulations of the Maquoketa River Watershed Using SWAT**. Center for Agricultural and Rural Development (CARD). Ames, Iowa State University, (Publications 09-wp492).2009.

JHA, M. K. Evaluating hydrologic response of an agricultural watershed for watershed analysis. **Water**, v. 3, p. 604-617, 2011.

KRAUSE, P.; BOYLE, D. P.; BASE, F. 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. **Advances in Geosciences**, Göttingen, v. 5, p. 89- 97, 2005.

KUWAJIMA, J. I. **Análise do modelo SWAT como ferramenta de prevenção e estimativa de assoreamento no reservatório do Lobo (Itirapina/Brotas/SP)**. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) . Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. 158p. 2012.

LELIS, T.A. & CALIJURI, M.L. Modelagem hidrossedimentológica de bacia hidrográfica na região sudeste do Brasil, utilizando o SWAT. **Revista Ambiente e Água**, v. 5. p. 158-174, 2010.

LELIS, T. A. **Modelagem do escoamento superficial e perda de solo na bacia do Ribeirão São Bartolomeu, zona da mata de Minas Gerais, utilizando o simulador SWAT**. 2011. 164 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011.

LELIS, et al. Análise de sensibilidade e calibração do modelo SWAT aplicado em bacia hidrográfica da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** (Impresso), v. 36, p. 623-634, 2012.

LIMA COP20: **Un climate change conference 2014**. Disponível em: <http://www.cop20.pe/18389/5-imagenes-del-antes-y-despues-del-cambio-climatico-en-el-agua/>. Acessado em 06 de Janeiro 2015.

LINO, J. F. L.; CORSUIL, C. W.; KOBİYAMA, M. Análise da vazão da bacia hidrográfica do rio Preto com o modelo SWAT. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 18, 2009, Campo Grande. **Anais**. Porto Alegre: ABRH, 2009.

LOAGUE, K.; GREEN, R. E. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. **Journal Contaminant Hydrology**, v.7, p51-73, 1991.

LOPES, N. H. Y. **Análise da produção de água e sedimentos em microbacias experimentais com o modelo SWAT**. 2008. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

LYRA, G. B.; CECILIO, R. A.; ZANETTI, S. S.; LYRA, G. B. Coeficiente de rugosidade de Manning para o rio Paracatu. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 14, n. 4, p. 343-350, 2010.

MACHADO, C. A. **Modelagem da qualidade da água na bacia hidrográfica do rio siriri-SE. Dissertação** (Mestrado em desenvolvimento e meio ambiente) – Universidade Federal de Sergipe, 2013.

MACHADO, R. E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**. 2002. 154 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

MACHADO, R. E., VETTORAZZI, C. A. Simulação da produção de sedimentos para a microbracia hidrográfica do Riberão dos Marins (SP). **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 27, p. 735-741, 2003.

MACHADO, R. E., VETTORAZZI, C. A.; CRUCIANI, D. E. Simulação de escoamento em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. V.8, n. 1, p. 147-155. 2003.

MACHADO, R. E., VETTORAZZI, C. A.; XAVIER, A. C. Simulação de cenários alternativos de uso da terra em uma microbacia utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. **Revista Brasileira Ciência e Solo**. v. 27, p. 727-733, 2003.

MALUTTA, S. **Aplicação do modelo SWAT na bacia do rio Negrinho – SC**. 2010. 97 f. Trabalho Técnico Científico (Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

MARCHIORO, E. **Modelagem hidrossedimentológica na bacia do córrego Santa Maria: Subsídios à Aplicação de Práticas de Conservação de Água e Solo no Noroeste Fluminense**. Tese (doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 218p, 2008.

MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H. Monitoramento de bacias hidrográficas para identificar fontes de sedimentos em suspensão. **Ciência Rural** [online]. vol.41, n.3, pp. 424-432. ISSN 0103-8478. 2011

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. Companhia de Desenvolvimento do vale do São Francisco (CODEVASF). Inventário de Projetos. 3ª Ed. **Revista Atualizada. Brasília**. Pág. 45. 1999.

MINISTERIO DA CULTURA – IPHAN. **Sistema integrado de conhecimento e gestão. Modulo 1: Contextualização geral bacia hidrográfica do rio São Francisco**. 51p. Disponível em: <http://portal.iphan.gov.br/portal/baixaFcdAnexo.do?id=1324>. Acessado 6 janeiro 2015.

MORAES, J. M. Propriedades físicas dos solos na parametrização de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.8, n.1, p.61-70, 2003.

MORIASI, D. N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

MORO, M. **A utilização da interface SWAT-SIG no estudo da produção de sedimentos e do volume de escoamento superficial com simulação de cenários alternativos**. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. 100 p. 2005.

MOTA, J. C. A., JÚNIOR, R. N. de A., FILHO, J. A.; LIBARDI, P. L. Algumas propriedades físicas e hídricas de três solos na chapada do Apodi, RN, cultivados com melão. **Revista Brasileira De Ciência Do Solo**, 32: 49-58, 2008.

NASH J.E., SUTCLIFFE J.E. River flow forecasting through conceptual models. Part I—A discussion of principles. **Journal of Hydrology**. 290 p, 1970.

NEITSCH, S.L., ARNOLD, J.G., KINIRY, J.R., WILLIAMS, J. R.. **Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2005**. Grassland, Soil and Water Research Laboratory; Agricultural Research Service; USA. 2005.

NEITSCH, S.L., ARNOLD, J.G., KINIRY, J.R., WILLIAMS, J. R.. **Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009 (Portuguese)**. Grassland, Soil and Water Research Laboratory; Agricultural Research Service; USA. 2011

OLIVEIRA, L. C. K. **O Papel do Monitoramento e da Previsão de Vazões no Gerenciamento de Bacias Hidrográficas**. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 168 p, 2003.

OLIVERA, F et al. ArcGIS-SWAT: A Geodata Model and GIS interface for SWAT. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 42, n. 2, p. 295-309. 2006.

OLIVEIRA, L.T. **Aplicação do modelo SWAT para simular vazões em uma bacia hidrográfica em Aracruz, ES**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade Federal do Espírito Santo. 162p, 2014.

PAPPAGALLO, G.; LO PORTO, A.; LEONE, A. **Use of the SWAT model for evaluation of anthropic impacts on water resources quality and availability in the Celone Creek basin (Apulia 7 Italy)**. 2nd International SWAT Conference. TWRI Technical Report. 266. Baria/Italy. 2003.

PERAZZOLI, M; PINHEIRO, A; KAUFMANN, V. Efeitos de cenários de uso do solo sobre o regime hídrico e produção de sedimentos na bacia do Ribeirão Concórdia - SC. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 37, n. 5, p. 859-869, out. 2013.

PEREIRA, B. S; PRUSKI, F. F; SILVA, D. D; RAMOS, M. M. Estudo do comportamento hidrológico do rio São Francisco e seus principais afluentes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 11, n.6, p. 615-622. 2007.

PEREIRA, D de. R. et al. Hydrological simulation using SWAT model in headwater basin in Southeast Brazil. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.34, n.4, p.789-799. 2014.

PETERSON, J. R.; HAMLET, J. M. Hydrologic Calibration of the SWAT Model in a Watershed Containing Fragipan Soils. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 34, n.3, p. 531 – 544, 1998.

PINTO, D. B. F. Aplicação do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação hidrossedimentológica em bacia hidrográfica da Serra da Mantiqueira, MG. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 225 p. 2011.

PORTO, L.L.R.; SILVA, M.R.; ZAHED, F.K. **Medição de vazão e curva-chave**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Eng. Hidráulica e Sanitária. São Paulo, 34p. 2001.

PRUSKI, F. F.; BRANDAO, V. S.; SILVA, D. D. **Escoamento superficial**. Viçosa UFV, 2004.

RAO, N. H. Fiel test of a simple soil – water balance model of irrigated areas. **Journal of hidrology**, v – 9, n. 1- 2. 1987. p. 179 – 186.

REBOUÇAS, A. C. **Água doce no mundo e no Brasil**. In: REBOUÇAS, A. C., BRAGA, B. & TUNDISI, J. G. (Orgs.). **Águas Doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. 2 ed. São Paulo: Escrituras Editora, 2002. Cap. 1, p 01-37

RIGHETTO, A. M. **Hidrologia e Recursos Hídricos**. São Carlos EESC/USP, 840 p, 1998.

ROCHA, E. O. de. **Estudo ambiental integrado de processos hidrossedimentológicos e nutrientes na bacia hidrográfica do rio Piranga utilizando o SWAT**. 2013. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2013.

RODRIGUES, S. A; BATISTELA, G. C. Uma Revisão Sobre A Disponibilidade Hídrica Brasileira Para Geração De Energia Elétrica. **Geoambiente On-Line. Jataí - GO**. n.21. 20p. 2013.

ROUHOLAHNEJAD, E.; ABBASPOUR, K. C.; VEJDANI, M.; SRINIVASAN, R.; SCHULIN, R.; LEHMANN, A. A parallelization framework for calibration of hydrological models. **Environmental Modelling e Software**, Trier, v. 31, p. 28-36, 2012.

SANTANA, L. L. Efeitos da variabilidade de cenários de uso do solo sobre a dinâmica da vazão e de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Jacaré – SE, 2015. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos). Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, SE, 2015.

SANTOS, I. et al. **Desenvolvimento de modelo de avaliação da qualidade de água e transporte de sedimentos para pequenas e médias centrais elétricas: modelagem da erosão e transporte de sedimentos.** Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC). Curitiba – PR, 91 p, 2005.

SANTOS, R. C. **Classificação textural aplicada à cobertura do solo de uma bacia hidrográfica usando sensoriamento remoto.** 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 153 p, 2002.

SANTOS, R. F. **Planejamento ambiental: teoria e prática.** São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

SANTOS, I.; KOBAYAMA, M. Aplicação do TOPMODEL para determinação de áreas saturadas da bacia do Rio Pequeno, São José dos Pinhais, PR, Brasil. **Revista Ambi-Água**, v. 3, n. 2, p. 77-89, 2008.

SANTOS, C. A. G.; SILVA, R. M. Aplicação do modelo hidrológico AÇUMOD baseado em SIG para gestão de recursos hídricos do rio Pirapama, Pernambuco, Brasil. **Revista Ambi-Água, Taubaté**, v. 2, n. 2, p. 7-20, 2007.

SANTOS, H. B., BARRETO, M. C., FACCIOLI, G. G. Qualidade da água de drenagem em reuso direto no perímetro irrigado Betume-SE. In: AGUIAR NETTO, A. O; SANTANA, N. R. **Contexto socioambiental das águas do rio São Francisco.** São Cristóvão: Editora UFS, 342P. 2015.

SARETTA, E. **Desenvolvimento de um sistema para ensaios de molinetes.** Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba, 77 p. 2013.

SERGIPE. SECRETARIA DE ESTADO DO PLANEJAMENTO E DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA – SEPLANTEC. SUPERINTENDENCIA DE ESTUDOS E PESQUISAS - SUPES. Perfis Municipais: Aracaju, 75v. 1997

_____. SUPES – Superintendência de Estudos e Pesquisas. Informes Municipais: Aracaju, 75v. 2000.

_____. SEPLANTEC - Secretaria de Estado do Planejamento e da Ciência e Tecnologia- **Projeto Cadastro da Infra-Estrutura Hídrica do Nordeste** – Sergipe, Aracaju, Maio, 2004.

_____. SEPLANTEC - Secretaria de Estado do Planejamento, da Ciência e da Tecnologia. **Unidades de Planejamento Sergipe.** SRH/ SEPLANTEC/ Governo do Estado de Sergipe. 2004.

_____. SEMARH – Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos. **Atlas digital sobre recursos hídricos de Sergipe**. SRH/SIRHSE. Sergipe, 2014.

SETTI, A. A. et al. **Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos**. 2 ed. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas, 207 p. 2001.

SHIKLOMANOV, I. A; **World Water Resources A New Appraisal and Assessment for The 21st Century**. UNESCO. 37p. 1998

SILVA, D; NHAMPOSSA, J.A; NEVES, M. A; SALAZAR, R.C. Caracterização macroscópica do estado de impacto ambiental de nascentes do rio Betume. In: AGUIAR NETTO, A. O; SANTANA, N. R. **Contexto socioambiental das águas do rio São Francisco**. São Cristóvão: Editora UFS, 342P. 2015.

SILVA, M. G. DA. **Modelagem ambiental na bacia hidrográfica do rio Poxim-Açu/SE e sus relações antrópicas**. Tese (Doutorado em desenvolvimento e meio ambiente) – Universidade Federal de Sergipe, 224 p. 2013.

SILVA, R.C.V. et al. **Hidráulica fluvial**. Rio de Janeiro: COPPE / UFRJ. V.1, 428p, 2003

SOUZA, R. M.; SANTOS, I. DOS. Estimativa da variabilidade espacial de vazões mínimas na bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro, região sul-brasileira, com aplicação do modelo SWAT. **RAEGA-O espaço geográfico em análise**. v. 28, p. 134-153, 2013.

SRINIVASAN, V.S., et al. **Bacia Experimental de São João do Cariri-PB**. In: **Righetto, A.M. (Org.), Implantação de Bacias Experimentais no Semi-árido**, Cap. 4, FINEP/FUNPEC/CNPq/CTBRASIL. 93-126. 2004

SRINIVASAN, R. and ARNOLD, J.G. Integration of the basin-scale water quality model With GIS. **Water Resources Bulletin**, v.30, n.03, p. 453-462, 1994.

STRAUCH, M.; BERNHOFER, C.; KOIDE, S.; VOLK, M.; LORZ, C. & MAKESCHIN, F. Using precipitation data ensemble for uncertainty analysis in SWAT stream flow simulation. **Journal of Hydrology**., 414-415:413-424, 2012.

TIBEBE, D. & BEWKET, W. Surface Runoff and soil erosion estimation using the SWAT model in the Keleta watershed, Ethiopia. **Journal Land Degradation and Development**. 22: 551-564. 2010.

TUCCI, C. E. M. et al. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 2a edição. Porto Alegre. Editora da UFRGS/ABRH, 1997. 943 p.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH: Editora UFRGS, 2005.

TUNDISI, J. G. Ciclo hidrológico e gerenciamento integrado. **Ciencia e Cultura**, v. 55, n.4, p.31-33, 2003.

USDI. **Water measurement manual**: A water resources technical publication. 3. ed. Washignton, DC: U. S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 317p. 2001.

USGS. **Meassurement and computation of streamflow**: Measurement of stage and dischargue. V. 1. Washington, DC: U. S. Government Printing Office, 284p. 1982.

UZEIKA, T. Use of the SWAT model for hydro-sedimentologic simulation in a small rural watershed. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 557-565, 2012.

UZEIKA, T. **Aplicabilidade do Modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) nasimulação da produção de sedimentos em pequena bacia hidrográfica rural**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 144p. 2009.

Van GRIENSVEN, A. et al. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. **Journal of Hydrology**, v. 324, p. 10-23, 2006.

VALERIANO, M. M. **TOPODATA: Guia para utilização de dados geomorfológicos locais**. INPE, São José dos Campos. 2008.

WHITE, K. L.; CHAUBEY, I. Sensitivity Analysis, Calibration and Validation for a Multisite and Multivariable SWAT Model. **Journal of the American Water Resources Association**. October, p. 1077– 1089. 2005.

WISCHEMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Soil loss estimation as a tool in the soil and water management planning**. International Association of Science, Hidrology Pub, pp. 148-159. 1965

WISCHMEIER, W.H. & SMITH, D.D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. Washington, United States Department of Agriculture, 1978.

YOUNG, R. A.; ONSTAD, C. A.; BOSH, D. D. and ANDERSON, W. P. AGNPS: A nonpoint - sources pollution model for evaluating agricultural watershed. **Journal of Soil and Water Conservation**, vol. 44, n. 2, p. 168 – 173. 1989.

ZHANG, J.; et al. The SWAT model applied in the water resources management for Guishui River Basin, Beijin. In: Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering (RSETE), 2012. **Anais:2nd International Conference on Nanjing**. p. 1-4. DOI: 10.1109/RSETE.2012.6260790. 2012.

ANEXOS

ANEXO A – Dados dos solos obtidos no levantamento de campo e analisados no ITPS para modelagem da bacia hidrográfica do rio Betume

VARIAVEIS		SOLOS					
NOME SOLO (SNAM)	Argissolo Vermelho Amarelo		Espodossolos	Neossolos	Planossolos	Neossolo Quartzarrênico	
NLAYERS-Número de Camadas	2		1	1	1	2	
HYDGRP-Grupo Hidrológico	B		B	A	B	B	
SOL_ZMX-Profundidade	500.00		200.00	200.00	200.00	300.00	
ANION_EXCL-Porosidade de Anions (fração)	0.49					0.45	
Camadas	1	2	1	1	1	1	2
SOL_Z-Profundidade (mm)	235.00	500.00	200.00	200.00	200.00	150.00	300.00
SOL_BD-Densidade do solo (g/cm ³)	1.54	1.66	1.10	1.02	1.08	1.52	1.70
SOL_AWC-Água disponível (mm/mm)	0.30	0.42				0.30	0.12
SOL_CBN-Carbono orgânico (%)	0.63	0.50	1.21	1.35	1.23	1.02	1.11
SOL_K-Conductividade hidráulica (mm/h)	24.03	39.21				50.17	55.75
CLAY-Argila (%)	11.82	13.78	28.81	26.29	28.21	4.03	4.23
SILT-Silte (%)	22.17	18.21	25.40	40.91	27.40	13.34	13.26
SAND-Areia (%)	66.01	68.01	45.79	32.80	44.39	82.64	82.52
SOL_ALB-Albedo (fração)	0.20	0.20	0.00	0.00	0.00	0.20	0.20
Valor M USLE	1952.43	1542.71				1283.05	1267.65
SOL_EC-Conductividade elétrica (dS/m)	0.43	0.44	0.59	0.21	0.70	0.66	0.51
Matéria orgânica	1.09	0.85	22.30	21.90	22.20	1.76	1.92
Estrutura do solo	3.00	3.00				3.00	3.00
Classe de permeabilidade do perfil	3.00	3.00				1.00	1.00
Fator USLE_K	0.16	0.13				0.06	0.06

ANEXO B - Parâmetros para a Estação do Gerador Climático do SWAT na modelagem da bacia hidrográfica do rio Betume.

Parâmetro	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
TMP_MX	29.69	29.93	29.51	28.07	27.13	25.65	25.02	25.22	26.54	27.82	28.97	27.59
TMP_MM	21.52	22.41	22.73	22.38	21.99	20.74	19.35	19.85	20.06	20.63	21.11	22.65
DV_TMX	1.34	1.35	1.08	1.14	1.11	1.15	1.23	0.98	1.24	1.09	0.96	1.18
DV_TMIN	1.12	1.34	0.96	1.01	0.99	0.98	1.98	1.32	1.21	1.22	1.55	1.24
PCP	81.67	68.73	84.32	117.49	219.98	231.32	172.18	125.58	75.43	59.83	30.02	71.27
DV_PCP	6.24	6.54	7.53	8.94	12.81	12.42	7.75	6.03	4.98	3.94	4.12	6.12
SKW_PCP	20.00	20.00	19.31	9.65	6.23	2.92	2.81	3.08	6.15	14.82	20.00	20.00
PR_W1	0.70	0.94	0.66	0.93	0.47	0.26	0.29	0.33	0.63	0.94	0.94	0.94
PR_W2	0.46	0.27	0.34	0.87	0.94	0.94	0.94	0.94	0.47	0.30	0.14	0.25
PCP_DAYS	7.67	8.83	10.33	15.67	18.50	24.00	24.33	23.00	12.33	8.33	10.17	7.17
SOLAVG	24.80	24.92	22.77	20.24	16.77	15.55	16.45	18.78	21.76	24.83	25.30	24.92
DEWPT	16.62	21.46	21.55	20.90	20.83	19.84	18.08	19.11	19.24	19.47	20.25	21.76
WNAV	1.95	1.48	1.10	1.23	1.28	1.11	1.21	1.51	1.79	1.99	1.88	1.76

TMP_MX – Média da Temperatura máxima diária(°C); TMP_MM – Média da Temperatura mínima diária(°C); DV_TMX – Desvio padrão da temperatura máxima; DV_TMIN – Desvio padrão da temperatura mínima; PCP – Média diária da precipitação (mm); SKW_PCP – Coeficiente skew para a precipitação diária; PR_W(1) – Probabilidade de dia com chuva seguido de um dia seco; PR_W(2) – Probabilidade de um dia de chuva seguido de outro dia de chuva; RAINHHR – Chuva máxima em meia hora; PCP_DAYS – N° médio de dias chuvosos; SOLAVG – Radiação solar média diária no mês (MJ.m².dia⁻¹); DEWPT – Temperatura média diária do ponto de orvalho (°C); WNAV – Velocidade do vento médio diário no mês (m.s⁻¹).

ANEXO C – Valores de cota (m) e respectivas vazões ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) para o rio Betume

Cota	Vazão	Cota	Vazão	Cota	Vazão	Cota	Vazão
1.38	0.77	1.46	0.91	1.65	2.46	1.87	6.41
1.39	0.78	1.46	0.99	1.66	2.59	1.88	6.65
1.40	0.78	1.47	0.95	1.67	2.72	1.89	6.89
1.40	0.78	1.48	0.99	1.68	2.86	1.9	7.13
1.40	0.79	1.48	1.09	1.69	3.00	1.92	7.64
1.40	0.80	1.50	1.21	1.7	3.15	1.93	7.90
1.41	0.77	1.52	1.21	1.71	3.31	1.95	8.43
1.41	0.78	1.52	1.35	1.72	3.46	1.96	8.70
1.41	0.80	1.53	1.28	1.73	3.63	1.97	8.98
1.42	0.78	1.54	1.35	1.74	3.79	1.99	9.55
1.42	0.79	1.54	1.51	1.75	3.97	2.02	10.44
1.42	0.80	1.55	1.43	1.76	4.15	2.03	10.75
1.42	0.82	1.56	1.51	1.77	4.33	2.04	11.06
1.42	0.85	1.56	1.68	1.78	4.51	2.05	11.38
1.43	0.80	1.57	1.59	1.8	4.90	2.06	11.70
1.43	0.82	1.58	1.68	1.81	5.10	2.07	12.03
1.43	0.85	1.59	1.78	1.82	5.31	2.18	15.93
1.44	0.80	1.61	1.99	1.83	5.52	2.24	18.31
1.44	0.85	1.62	2.10	1.84	5.74	2.28	19.99
1.44	0.91	1.63	2.21	1.85	5.96	2.3	20.86
1.45	0.87	1.64	2.33	1.86	6.18		

Fonte: SEMARH

ANEXO D – Vazões calculadas a partir das equações polinomial e exponencial da curva-chave do rio Betume

h (m)	Q_{obs} (m³.s⁻¹)	Polinomial Q_{cal}	Exponencial Q_{cal}	h (m)	Q_{obs} (m³.s⁻¹)	Polinomial Q_{cal}	Exponencial Q_{cal}
1.38	0.77	0.48	0.79	1.65	2.46	2.63	2.47
1.39	0.78	0.52	0.79	1.66	2.59	2.76	2.60
1.4	0.78	0.57	0.80	1.67	2.72	2.89	2.73
1.4	0.78	0.57	0.80	1.68	2.86	3.02	2.87
1.4	0.80	0.57	0.80	1.69	3.00	3.16	3.01
1.41	0.77	0.62	0.81	1.7	3.15	3.30	3.16
1.41	0.78	0.62	0.81	1.71	3.31	3.45	3.31
1.41	0.80	0.62	0.81	1.72	3.46	3.60	3.47
1.42	0.78	0.67	0.82	1.73	3.63	3.76	3.63
1.42	0.79	0.67	0.82	1.74	3.79	3.91	3.80
1.42	0.80	0.67	0.82	1.75	3.97	4.08	3.97
1.42	0.82	0.67	0.82	1.76	4.15	4.25	4.15
1.42	0.85	0.67	0.82	1.77	4.33	4.42	4.33
1.43	0.80	0.72	0.84	1.78	4.51	4.59	4.52
1.43	0.82	0.72	0.84	1.8	4.90	4.96	4.91
1.43	0.85	0.72	0.84	1.81	5.10	5.15	5.11
1.44	0.80	0.77	0.86	1.82	5.31	5.34	5.32
1.44	0.85	0.77	0.86	1.83	5.52	5.54	5.53
1.44	0.91	0.77	0.86	1.84	5.74	5.75	5.74
1.45	0.87	0.83	0.89	1.85	5.96	5.96	5.96
1.46	0.91	0.89	0.92	1.86	6.18	6.17	6.19
1.46	0.99	0.89	0.92	1.87	6.41	6.39	6.42
1.47	0.95	0.96	0.96	1.88	6.65	6.61	6.65
1.48	0.99	1.02	1.00	1.89	6.89	6.84	6.89
1.48	1.09	1.02	1.00	1.9	7.13	7.07	7.14
1.5	1.21	1.16	1.10	1.92	7.64	7.56	7.64
1.52	1.21	1.32	1.22	1.93	7.90	7.81	7.90
1.52	1.35	1.32	1.22	1.95	8.43	8.32	8.43
1.53	1.28	1.40	1.29	1.96	8.70	8.58	8.70
1.54	1.35	1.48	1.36	1.97	8.98	8.85	8.98
1.54	1.51	1.48	1.36	1.99	9.55	9.41	9.55
1.55	1.43	1.57	1.44	2.02	10.44	10.29	10.44
1.56	1.51	1.66	1.52	2.03	10.75	10.59	10.75
1.56	1.68	1.66	1.52	2.04	11.06	10.90	11.06
1.57	1.59	1.75	1.61	2.05	11.38	11.22	11.38
1.58	1.68	1.85	1.70	2.06	11.70	11.54	11.70
1.59	1.78	1.95	1.79	2.07	12.03	11.86	12.03
1.61	1.99	2.16	2.00	2.18	15.93	15.86	15.93
1.62	2.10	2.28	2.11	2.24	18.31	18.37	18.30
1.63	2.21	2.39	2.22	2.28	19.99	20.17	19.98
1.64	2.33	2.51	2.34	2.3	20.86	21.12	20.85